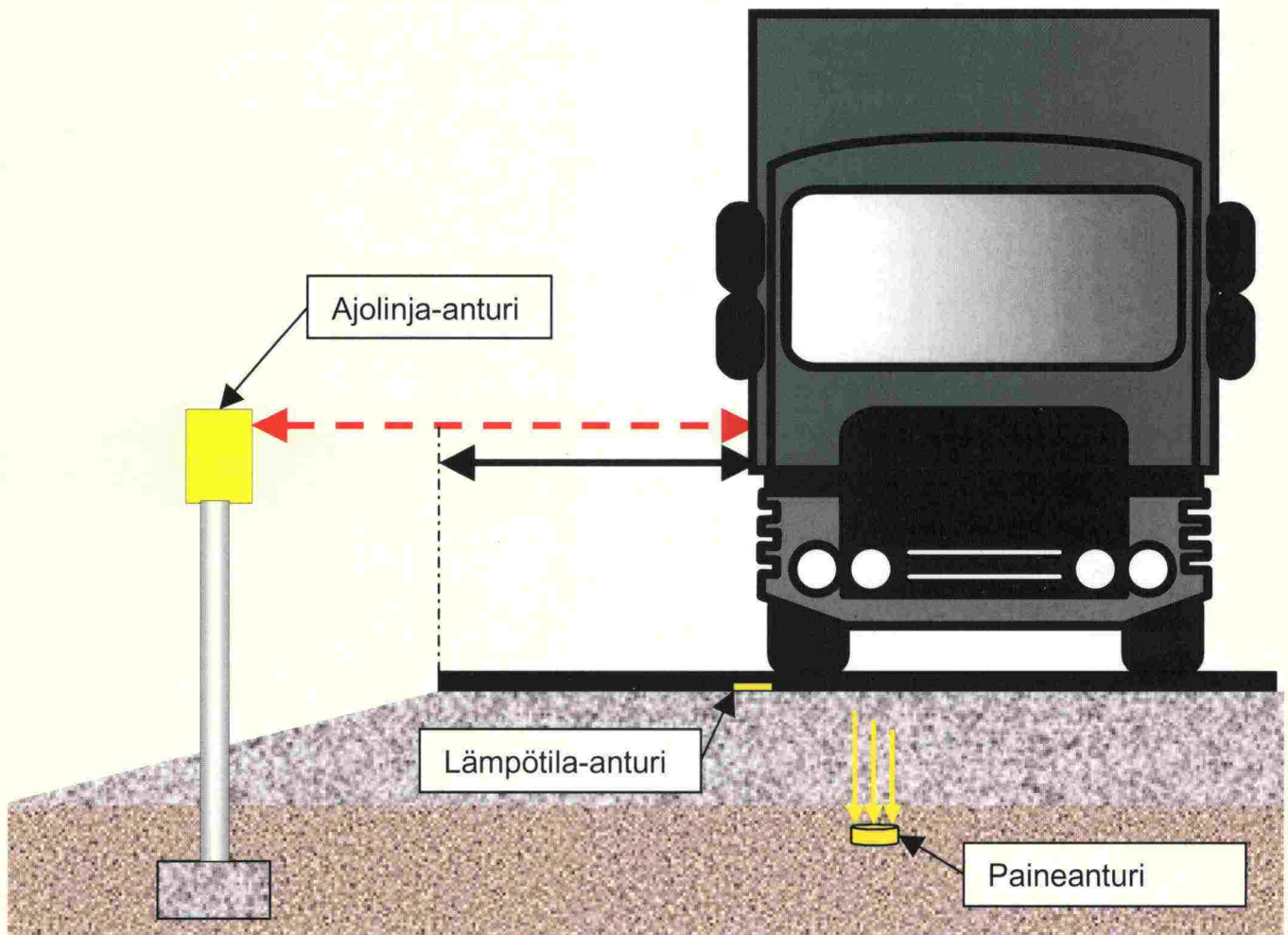


Mika Savolainen, Teuvo Ryyänen, Jouko Belt, Esko Ehrola

Liikennekuormitusten määrittäminen tierakenteen vasteiden avulla

Tiehallinnon selvityksiä 22/2001



Mika Savolainen, Teuvo Ryynänen, Jouko Belt, Esko Ehrola

Liikennekuormitusten määrittäminen tierakenteen vasteiden avulla

Tiehallinnon selvityksiä 22/2001

ISSN 1457-9871

ISBN 951-726-753-8 3

TIEH 3200669

Edita Oy
Helsinki 2001

Julkaisua myy:
Tiehallinto, julkaisumyynti
telefaksi 0204 22 2652
e-mail julkaisumyynti@tiehallinto.fi



TIEHALLINTO
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 22 150

Mika Savolainen, Teuvo Ryyänen, Jouko Belt, Esko Ehrola: Liikennekuormitusten määrittäminen tierakenteen vasteiden avulla. Helsinki 2001. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 22/2001. 67 s. + liitt. 5 s. ISSN 1457-9871. ISBN 951-726-753-3. TIEH 3200669.

Avainsanat: tierakenne, raskaat ajoneuvot, akselipaino, kuormitus, mittausmenetelmät
Aiheluokka: 32

TIIVISTELMÄ

Temmeksen koetiekohteessa on mitattu liikennekuormitusten tierakenteeseen aiheuttamia vasteita ja ympäristöolosuhteita vuodesta 1997 lähtien. Kesällä 2000 kohteeseen asennettiin laser-etäisyydenmittaukseen perustuva ajotapamittausjärjestelmä. Mittausjärjestelmän toiminta ja antureiden antamien tulosten luotettavuus on todettu jo aikaisemmin hyväksi. Tässä työssä tarkastellaan akselimassojen määrittämistä tierakenteen sisältä mitattujen paineiden perusteella, mikä mahdollistaisi luotettavasti toimivan kuormitusmittausjärjestelmän kehittämisen.

Akselimassojen ja niiden aiheuttamien paineiden yhteyden määrittäminen edellyttää laajan mittausaineiston käyttöä, koska paineen suuruuteen vaikuttaa useita kuormitukseen ja olosuhteisiin liittyviä tekijöitä, joilla on myös selkeitä yhteisvaikutuksia. Tarkasteltavaksi vasteeksi valittiin suodatinkerroksen yläosasta mitattu pystysuora paine. Mittaustulokset käsiteltiin siten, että paineet voitiin yksilöidä ajoneuvo- ja akseliryhmäkohtaisesti. Käsiteltyihin painetuloksiin liitettiin ajotapa- ja olosuhde-tiedot ja muodostettiin tietokanta, johon saatiin yli 22 000 raskaan ajoneuvon tulokset kesältä 2000. Tietokannan pohjalta mallinnettiin eri tekijöiden vaikutukset paineisiin ja määritettiin menetelmä, jolla voidaan laskea akselimassa. Tässä työssä tarkastellaan vain yksikköpyörillä varustettujen yksittäisakselien (etuakselit) massojen määrittämistä. Samalla periaatteella ovat määritettävissä myös muiden rengas-tus- ja akselityyppien massat.

Menetelmän luotettavuutta tarkasteltiin koetiealueella tehtyjen kuormitustestitulosten perusteella. Menetelmällä määritetyt yksittäisakselien massat vastasivat punnit-tuja staattisia massoja suhteellisen hyvin. Vastaavalla tarkkuudella toimiva WIM-vaaka sijoittuu eurooppalaisen tutkimusyhteistyöelimen COST-323:n luokituksen mukaan luokkaan B(10) eli tarkkuus riittää yksittäisakselien osalta yksityiskohtais-ten tietojen keräämiseen liikenteestä.

Tulosten perusteella on mahdollista kehittää painemittaukseen perustuva edullinen ja toimintavarma akselimassojen määrittämissysteemi, jolla voitaisiin mitata myös paljon muita raskaaseen liikenteeseen ja tierakenteen toimintaan liittyviä tietoja. Tämä edellyttää kuitenkin lisäselvityksiä, joihin Temmeksen koetiekohteen mittauk-set antavat erinomaisen pohjan.

Tämän työn tuloksena saatu tietokanta antaa lisäksi hyvän pohjan monien erilaisten tierakenteen toimintaan liittyvien tekijöiden tarkasteluun Temmeksen koetiekoh-teessa. Kun tunnetaan kuormituksen suuruus, sijainti, kuormitusaika ja kuormituk-sen aiheuttamat vasteet sekä vallinneet olosuhteet, voidaan esimerkiksi selvittää eri tekijöiden vaikutuksia koetiekohteessa mitattuihin kriittisiin vasteisiin ja sitä kautta vaurioitumiseensa.

Mika Savolainen, Teuvo Ryyänen, Jouko Belt, Esko Ehrola: Liikennekuormitusten määrittäminen tierakenteen vasteiden avulla. [Determination of Traffic Loads from Road Structure Responses]. Helsinki 2001. Finnish Road Administration. Finnra Reports 22/2001. 67 p. + app. 5 p. ISSN 1457-9871. ISBN 951-726-753-3. TIEH 3200669.

Keywords: pavement, heavy vehicle, axle load, stress, measurement, test road

ABSTRACT

Records of environmental conditions at the test road in Temmes and responses of the road structure to traffic loads are available for the whole period since the completion of the road in autumn 1997, and measurements of the driving lines and traffic velocity based on laser sensors were started in summer 2000. The measuring system and sensors have proved reliable in earlier research. The aim of this study was to find out if it is possible to determine axle loads from stresses measured in the road structure. This would make it possible to develop a reliable system for measuring axle loads in motion under Finnish conditions.

There are many factors that affect the stresses caused by axle loads, most of which also have co-operative impacts on pressures. In order to define the effects of these numerous factors and their co-operative impacts, a large body of data was needed. The vertical pressure in the sand layer below the sub-base was chosen as the response to be examined. The dynamic pressure caused by each measured axle load was defined and a database created from the processed pressure measurements. The environmental and driving line results were also processed and added to the database. This yielded results applying to more than 22 000 heavy vehicles in summer 2000.

The impacts of the factors affecting the vertical pressure in the sand layer were defined by linear regression, after which a method could be elaborated for calculating the front axle weights. The accuracy of the method was tested using the results of special loading tests arranged at the test road in summer 1998. According to the COST-323 classification of WIM systems, the accuracy of the system met the requirements for class B(10), which is good enough for detailed traffic analysis, for example.

The results suggest that it is possible to develop an inexpensive and reliable system for traffic load measurements, and that there are many factors connected with heavy traffic and the performance of the road structure that could be measured by using several pressure sensors.

The database constructed for this purpose also provides a good basis for assessing the performance of a road structure subjected to traffic loads under various sets of environmental conditions. It is possible, for example, to determine the impact of different factors on critical responses and thereby on the deterioration of the road structure.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus kuuluu Oulun yliopiston sekä Oulun tiepiirin vuonna 1996 käynnistämään Temmeksen koetieprojektiin, jossa mitataan liikenteen tierakenteeseen aiheuttamia vasteita ja ympäristöolosuhdetietoja. Koetietutkimuksen tavoitteena on selvittää liikenne- ja ympäristökuormitusten vaikutuksia tierakenteen rasitukseen ja sitä kautta tuottaa perustietoa tierakenteen suunnittelumenetelmien kehittämiseen.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin erilaisten kuormitus- ja olosuhdetekijöiden vaikutuksia suodatinkerroksen paineisiin ja kehitettiin menetelmä, jolla voidaan määrittää koealueen yli ajaneiden raskaiden ajoneuvojen akselimassoja.

Tutkimus on tehty diplomityönä Oulun yliopiston Tie- ja liikennetekniikan laboratoriossa. Raportin on laatinut tekn. yo Mika Savolainen. Työtä ovat ohjanneet professori Esko Ehrola, tekniikan lisensiaatti Jouko Belt sekä diplomi-insinööri Teuvo Ryyänen.

Oulussa huhtikuussa 2001

Sisältö

1	JOHDANTO	10
1.1	Tutkimuksen tausta	10
1.2	Tutkimuksen tarkoitus ja rakenne	11
2	TEMMEKSEN KOETIE	12
2.1	Koetien rakenne ja instrumentointi	12
2.2	Mittausjärjestelmä	14
2.3	Koetien vaurioituminen	17
3	AINEISTOT JA NIIDEN KÄSITTELY	21
3.1	Käsittelyn tavoitteet	21
3.2	Painemittaustulokset	21
3.3	Ajotapatulokset	28
3.4	Ympäristöolosuhteiden mittaustulokset	29
3.5	Muut aineistot	30
3.6	Käsiteltyjen tulosten yhdistäminen	31
4	SUODATINKERROKSEN PAINEISIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	32
4.1	Kuormitus	32
4.2	Routa	34
4.3	Päällysteen lämpötila	39
5	AKSELIMASSOJEN MÄÄRITTÄMINEN	42
5.1	Lähtökohdat	42
5.2	Akselimassojen määrityksen periaatteet	44
5.3	Aineiston luokittelu	47
5.4	Tilastollinen käsittely	49
5.5	Ajolinjan ja lämpötilan vaikutusten mallinnus	53
5.6	Massojen laskentamenetelmä	56
6	PAINEMITTAUKSEEN PERUSTUVAN KUORMITUSMITTAUSJÄRJESTELMÄN PERIAATE	61
7	YHTEENVETO	63
	LÄHDELUETTELO	66
	LIITELUETTELO	67

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Liikenne on pääasiallinen tierakenteen vaurioitumiseen vaikuttava kuormitus. Liikennekuormituksen yksikkönä tierakenteen suunnittelussa käytetään kuormituskertalukua, joka tarkoittaa tietyn standardiakselin suuruisten kuormitusten lukumäärää poikkileikkauksessa laskenta-ajanjakson aikana. Kuormituskertaluvun määrittäminen perustuu akselimassatutkimusten perusteella määritettyihin ajoneuvotyyppien kuormitusvastaavuusarvoihin sekä liikennelaskentaan ja -ennusteisiin. Kuormitusten hajonta tien leveyssuunnassa otetaan huomioon tien leveydestä riippuvalla kertoimella.

Akselimassatutkimus on kallis, työläs ja otannat suhteellisen pieniä. Lisäksi tulokset vanhenevat nopeasti mm. ajoneuvotekniikan nopeasta kehityksestä johtuen. Viimeisin akselimassatutkimus tehtiin vuosien 1998 ja 1999 aikana ja tutkimusraportti ilmestyi toukokuussa 2000. Tutkimustulosten perusteella määritettiin raskaalle liikenteelle uudet ajoneuvotyyppikohtaiset kuormitusvastaavuusarvot eli kertoimet, joilla verrataan ajoneuvotyyppien keskimääräistä kuormitusvaikutusta standardiakselin kuormitusvaikutukseen. Kuormitusvastaavuudet poikkesivat vuoden 1986 tutkimuksen mukaan määritetyistä arvoista huomattavasti. Tulosten mukaan akselimassojen ja ajoneuvotekniikan muutoksista johtuvat lisäykset tieverkon kuormitusarvioon olivat tien toiminnallisesta luokasta riippuen 17% - 35% [Akselimassatutkimus, 2000]. Jotta tierakenteen liikennekuormitusta voitaisiin seurata säännöllisesti, tarvittaisiin menetelmä, jolla akselimassoja voitaisiin mitata reaaliaikaisesti. Tällä hetkellä ei kuitenkaan ole markkinoilla Suomen olosuhteisiin soveltuvaa automaattista akselipainovaakaa.

Tierakenteen toiminnallisen kestoajan ennustaminen edellyttää vaurioitumisen ja kuormitusvaikutusten yhteyden tuntemista. Tierakenteen vaurioitumiseen vaikuttavat hyvin monet liikennekuormituksiin ja olosuhteisiin liittyvät tekijät, joten vaurioitumisen ennustamiseksi täytyy löytää muuttujia, jotka kuvaavat kuormituksen ja vaurioitumisen välistä yhteyttä. Selkeimpiä em. yhteyttä kuvaavia tekijöitä ovat tierakenteesta mitattavat kuormitusten aiheuttamat vasteet, eli jännitykset ja muodonmuutokset. Tarkastelemalla eri tekijöiden vaikutuksia vasteisiin, saadaan kuva tekijöiden vaikutuksista vaurioitumiseen.

Vuonna 1997 valmistuneelta Temmeksen instrumentoidulta koetieosuudelta on mitattu ja arkistoitu liikenteen tierakenteeseen aikaansaamia vasteita ja olosuhdetietoja kesästä 1998 lähtien. Mittausjärjestelmää on testattu ja kehitetty jatkuvasti ja tulokset on raportoitu aiemmissa koetiekohdetta käsittelevissä diplomitoissa [Kilponen, 1996, Lämsä, 1998, Sikiö, 1999]. Kesällä 2000 valmistui koetiekohteen ympäristötekijöitä koskeva tutkimus [Ryynänen, 2000]. Tärkein näiden tutkimusten jälkeen tehty uudistus mittausjärjestelmässä on laser-etäisyydenmittaukseen perustuvan ajotapamittausjärjestelmän asentaminen ja kalibrointi. Laser-mittaus korvaa alkuperäisen suunnitelman mukaisen keskeneräiseksi jääneen, valokuituihin perustuvan ajo-

tapamittausjärjestelmän, jonka kehittämisestä vastasi Oulun yliopiston sähkötekniikan osasto.

Tällä hetkellä Temmeksestä on olemassa jo erittäin kattava aineisto liikennekuormitusten aiheuttamista vasteista erilaisissa ympäristöolosuhteissa. Kun näihin yhdistetään ajotapatiedot, voidaan tarkastella eri tekijöiden vaikutuksia liikennekuormitusten aikaansaamiin vasteisiin ja sitä kautta saadaan tietoa tierakenteen toiminnasta reaali liikenteen alla todellisissa olosuhteissa. Inventoimalla säännöllisesti tierakenteessa tapahtuvat rakenteelliset muutokset ja vauriot on mahdollista löytää uusia yhteyksiä tierakenteen rasitusten, olosuhteiden ja vaurioitumisen välille. Tulokset koskevat tietysti vain Temmeksen rakennetta ja Temmeksen olosuhteita, mutta ovat kuitenkin erinomaista vertailuaineistoa teoreettisille menetelmille ja laboratoriotutkimuksille. Toisaalta tulosten käsittelymenetelmiä voidaan käyttää myös muihin poikkileikkauksiin mahdollisesti asennettavien vastaavien järjestelmien kalibrointiin ja niiden antamien tulosten käsittelyyn.

Vaikka koetiekohdetta ei ole suunniteltu akselimassojen määrittämistä ajatellen, on tulosten alustavissa tarkasteluissa tullut esille mahdollisuus selvittää akselimassojen ja niiden aiheuttamien paineiden välinen yhteys. Eri tekijöiden vaikutusta on pyritty selvittämään koetiellä tehtyjen kuormitustestitulosten perusteella, mutta aineisto on liian suppea, jotta useiden eri tekijöiden vaikutukset voitaisiin ottaa huomioon. Tarkasteluissa on kuitenkin havaittu, että painemittaus toimii erittäin hyvin ja tulokset ovat loogisia. [Sikiö, 1999]

1.2 Tutkimuksen tarkoitus ja rakenne

Tämän työn tavoitteena on selvittää mahdollisuutta määrittää dynaamisia akselimassoja Temmeksen mittaustulosten perusteella, mikä edellyttää paine-kuormitus-yhteyteen vaikuttavien tekijöiden ja niiden vaikutusten määrittämistä. Lähtöoletuksena on, että selvittämällä ajotapa- ja olosuhdetekijöiden vaikutukset paineisiin, voidaan määrittää paineen aiheuttanut akselimassa. Olosuhde- ja ajotapatekijöiden vaikutusten tarkastelu perustuu laajan mittausaineiston käsittelyyn, jossa satunnaisien poikkeamien vaikutukset minimoituvat. Akselimassan ja paineen välinen yhteys tunnetuilla ajotapatiedoilla ja tunnetuissa olosuhteissa pyritään selvittämään koetiealueella järjestettyjen kuormitustestien tulosten ja viimeisimmän akselimassatutkimuksen aineiston perusteella.

Tässä työssä ei paneuduta enää mittausjärjestelmän toimintaan tai tulosten luotettavuuden tarkasteluun vaan katsotaan, että mittausjärjestelmän ja sen antamien tulosten luotettavuus on osoitettu aiemmissa diplomitöissä. Työssä keskitytään luotettaviksi osoitettujen tulosten käsittelyyn ja pyritään löytämään menetelmiä, joilla mittaustuloksia voidaan jalostaa tutkimustuloksiksi. Koska mittaustulosten määrä on erittäin suuri, täytyy käsittelyyn otettavat tulokset rajata siten, että mukaan saadaan mahdollisimman kattava aineisto, mutta käsittely ei tule liian raskaaksi. Tämän vuoksi tässä työssä keskitytään vain yhden luotettavasti toimivan paineanturin tuloksiin. Tarkasteltavaksi valitulla anturilla mitataan liikennekuormituksen suodatin-kerroksen yläosaan aiheuttamaa pystysuoraa painetta.

Tutkimuksen rakenne on periaatteessa hyvin yksinkertainen. Painemittaustuloksista määritetään jokaisen akseliylityksen aiheuttamat dynaamiset paineet eli akselipaineet, joilla tarkoitetaan akseliylityksen aikana mitatun maksimipaineen ja kuormittamattomassa rakenteessa vallitsevan lepopaineen erotusta. Tulosten perusteella akselipaineet yksilöidään ajoneuvo- ja akselikohtaisesti ja luodaan tietokanta, johon ajotapa- ja olosuhdetiedot voidaan yhdistää aikatietojen perusteella. Tämän jälkeen etsitään akselimassan ja sen aiheuttaman paineen yhteyteen vaikuttavat tekijät ja mallinnetaan niiden vaikutukset. Mallinnuksen ja tunnetuilla akselimassoilla saatujen tulosten perusteella määritetään akselimassalle funktio, jonka tekijöinä ovat koetiekohteelta mitattavat akselipaine ja massan ja paineen yhteyteen vaikuttavat olosuhde- ja ajotapatekijät.

Aluksi esitellään pääpiirteissään koetiealueen rakenteet ja instrumentointi sekä mitausjärjestelmän toiminta. Lisäksi selvitetään koetierakenteen kuntoa tehtyjen vaurioinventointien perusteella. Seuraavaksi esitellään tutkimuksessa käytettävät mittausaineistot ja niiden käsittely sekä käsiteltyjen tulosten pohjalta luotavat tietokannat ja niiden yhdistäminen. Tämän jälkeen tarkastellaan eri tekijöiden vaikutuksia mitattuihin paineisiin vuosien 1998 ja 1999 tulosten perusteella. Varsinainen akselimassojen määrittäminen tehdään kesän 2000 tulosten pohjalta, koska ajotapamittaustuloksia ei ole aikaisemmilta vuosilta.

Tulosten pohjalta tarkastellaan lisäksi periaatteellisella tasolla mahdollisuutta kehittää teknisesti yksinkertainen ja luotettavasti toimiva painemittaukseen perustuva mitausjärjestelmä, jolla voitaisiin määrittää liikennekuormituksia ja niiden vaikutuksia tierakenteen toimintaan.

2 Temmeksen koetie

2.1 Koetien rakenne ja instrumentointi

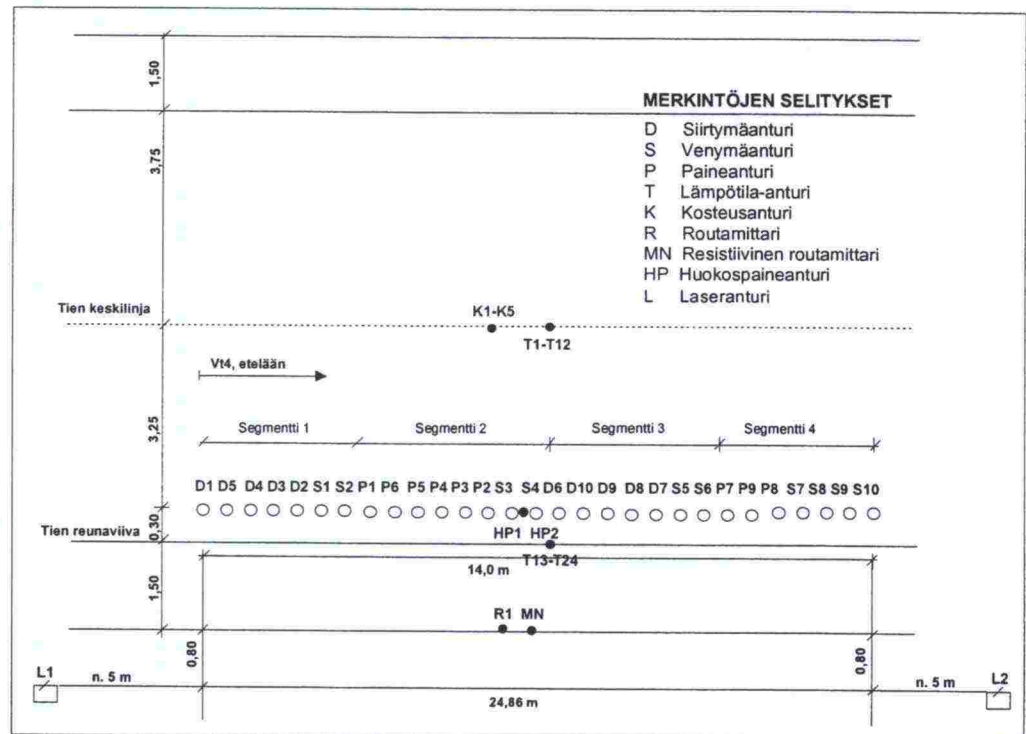
Temmeksen koetie valmistui rakenteen ja instrumenttien osalta syksyllä 1997. Koetie sijaitsee Vt 4:llä tieosalla 358. Etelää kohti mentäessä oikeanpuoleiselle kaistalle sijoittuva instrumentoitu alue on pituudeltaan 14 metriä. Yhteensä koealueen pituus on noin 80 metriä, jolloin instrumenttialueen etu- ja takapuolelle jää yli 30 metriä pitkä osuus antureista vapaata aluetta. Tällä on varmistettu, että instrumentoinnin ylittävä ajoneuvo on kokonaisuudessaan rakenteellisesti homogeenisella alueella. Muu tierakenne poikkeaa koealueen rakenteesta siten, että sen kantava kerros on stabiloitu kuonahiekan ja sementin avulla sekä ABK-kerros on 20 mm ohuempi kuin koetiealueella. [Sikiö, 1999, Lämsä, 1998]

Koetierakenteena on tyypillinen rakennevaihtoehto, jossa bitumilla sidottujen päällystekerrosten alla on kalliomurskeesta tehty kantava ja jakava kerros sekä yli metrin vahvuinen suodatinkerros (Taulukko 1). [Sikiö, 1999]

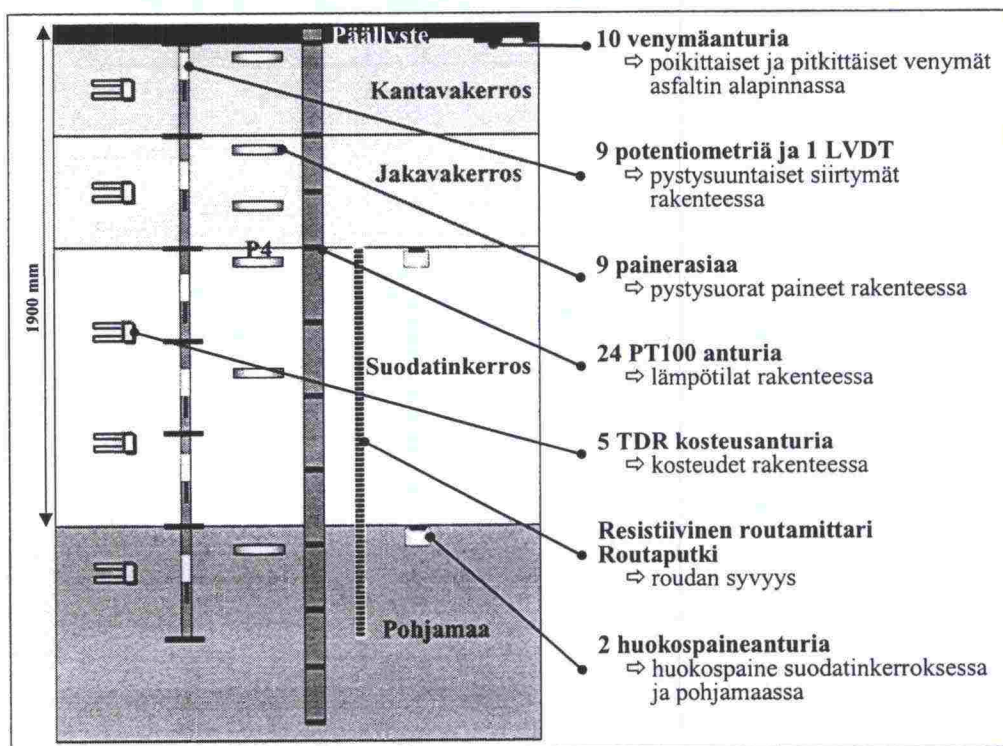
Taulukko 1. Koetierakenteen materiaalit ja niiden paksuudet. [Lämsä, 1998]

Rakennekerros	Paksuus [mm]	Materiaali
Päällysteen yläosa (kulutuseros)	50	AB 18/120
Päällysteen alaosa	50	ABK 14/120
Kantava kerros	250	KaM #0-55
Jakava kerros	350	KaM #0-100
Suodatinkerros	1230	Hk
Rakennekerrokset yhteensä	1930	
Pohjamaa	-	HkSi

Koetiehen asennettiin yhteensä 65 liikennekuormituksen synnyttämiä vasteita ja vallitsevia ympäristöolosuhteita mittaavaa instrumenttia. Instrumentit ovat kärsineet vaurioita niin rakennusaikana kuin myöhemminkin tapahtuneesta materiaalin liikkumisesta yms. syistä johtuen, mutta suurin osa antureista toimii edelleen. Antureiden sijainti koetiekohteessa käy ilmi kuvista 1 ja 2. [Sikiö, 1999, Lämsä, 1998]



Kuva 1. Antureiden sijainti koetiealueella. [Sikiö, 1999]



Kuva 2. Antureiden sijainti koetierakenteessa.

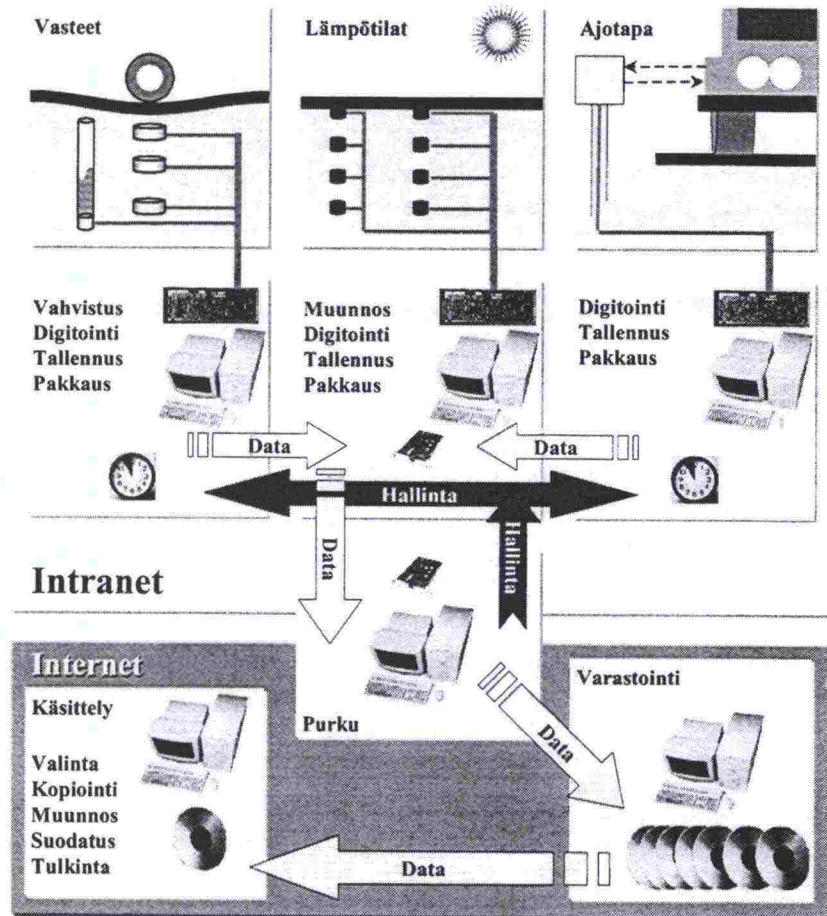
2.2 Mittausjärjestelmä

Mittausanturit jakautuvat kolmeen pääluokkaan; liikenteen kuormitusvaikutuksia, olosuhdetekijöitä ja ajotapatekijöitä mittaaviin antureihin. Liikennekuormituksen tierakenteeseen aiheuttamia kuormitusvaikutuksia mitataan siirtymä-, paine- ja venymäantureilla. Olosuhdetekijöitä mittaavia antureita ovat lämpötila-, routa-, kosteus- ja huokospaineanturit sekä pohjaveden korkeusanturit. Ajotapa-antureina toimivat laser -etäisyydenmittausanturit, joiden avulla määritetään koalueen ylittäneiden ajoneuvojen nopeus, pituus ja ajolinja.

Siirtymä-, venymä- ja paineantureilla voidaan mitata yhtäältä koetiekohteen ylittävän yksittäisen ajoneuvon tierakenteeseen synnyttämät muodonmuutokset ja jännitykset ja toisaalta pitkäaikaisen kuormituksen synnyttämät muutokset tierakenteen toiminnassa. Havaitut muutokset ovat yhteydessä tierakenteen väsymiseen ja vaurioitumiseen, joita seurataan tiekohteessa kunto- ja vauriomittauksilla. Ympäristötekijöitä mittaavilla antureilla saadaan tietoa olosuhteiden vaikutuksista tierakenteen kuormituskäyttäytymiseen. Yhdistämällä näihin ajotapamittaus saadaan mukaan myös kuormituksen sijainti ja kuormitusaika, jolloin saadaan tarkempi kuva kuormitusten vaikutuksista.

Koetiekohteessa on tehty suuri määrä mittauksia ja tehdään edelleen. Tämän vuoksi mittauksen ja mittaustiedon tallennuksen ja käsittelyn automatisointi on ollut perusedellytys mittaustoimintojen ja tulosdatan hallitsemiseen. Kaikki liikennekuormitusten vaikutuksia mittaavat anturit sekä ajotapa-anturit ovat automatisoinnin piirissä

(Kuva 3). Ympäristötekijöitä mittaavista antureista osa joudutaan hoitamaan manuaalisesti. Automatisoitujen mittauksen piirissä olevat tulokset pakataan ja siirretään kerran vuorokaudessa Ouluun, jossa tiedot puretaan ja arkistoidaan viikoittain. Varsinainen tulosten käsittely tehdään arkistoitujen tulosten pohjalta.

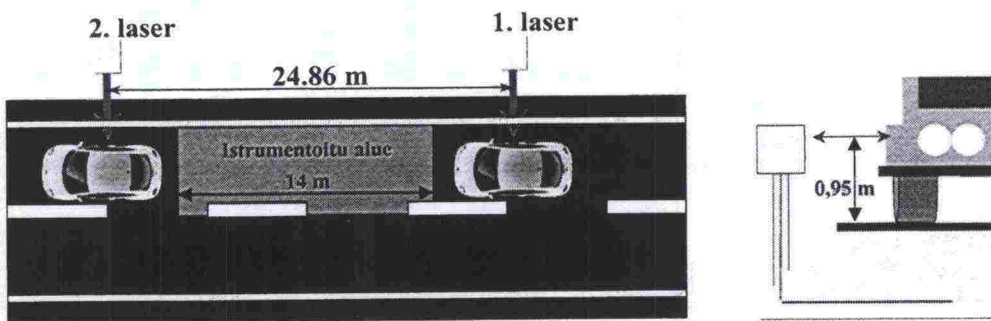


Kuva 3. Mittausjärjestelmän toimintaperiaate.

Mittausjärjestelmä tuottaa jatkuvasti erittäin suuren määrän tietoa, jonka käsittely ja arkistointi edellyttävät jatkuvaa kehitystä siirto- ja tallennuskapasiteetin kasvaessa. Mittaustiedon käsittelyn yhtenä tärkeänä periaatteena on, että mittausdataa suodataan mahdollisimman vähän ennen arkistointia. Tulokset pyritään siirtämään ja arkistomaan mahdollisimman täydellisinä, jotta mitään myöhemmin ehkä tärkeäksi havaittavaa tietoa ei kadotettaisi. Tulosten "raskaampi" suodatus tehdään vasta käsittelyn yhteydessä. Tämä edellyttää mittausjärjestelmän ylläpitäjältä sekä osaamista mittaus- ja tietotekniikan alueelta että tierakenteen toiminnan ymmärtämistä. Ei riitä, että osaa tehokkaasti suodattaa, pakata ja siirtää tietoa. Pitää ymmärtää myös, mikä tieto on tai saattaa tulevaisuuden tutkimusten kannalta olla oleellista.

Mittausjärjestelmän toimintaperiaate ja mittauslaitteiden tekniset tiedot on esitetty laajemmin aiemmissa koetiekohdetta käsittelevissä diplomitoissa. Suurin mittausjärjestelmään em. opinnäytteiden jälkeen tehty muutos on Laseretäisyydenmittaukseen perustuvan ajotapamittauksen lisääminen heinäkuussa 2000.

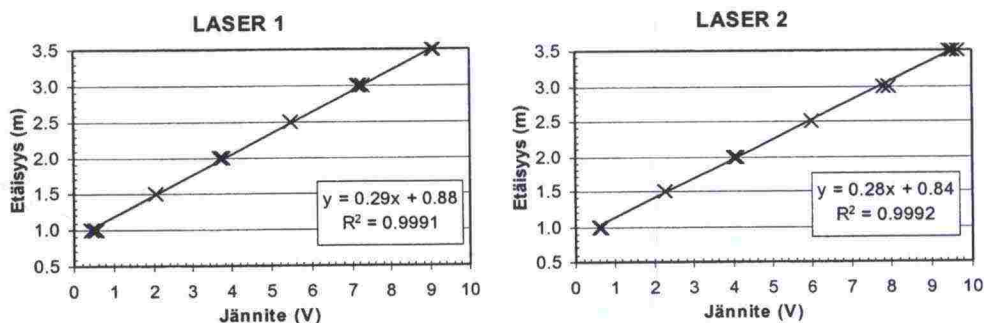
Järjestelmään kuuluu kaksi identtistä lasermittalaitetta, joista toinen on asennettu noin viisi metriä ennen koealuetta ja toinen noin viisi metriä koealueen jälkeen (Kuva 4). Mittausanturien korkeusasema päällysteen pinnasta on muutettavissa 60 ja 150 cm:n välillä. Tällä hetkellä anturit ovat noin 95 cm:n korkeudelle ajoradan pinnasta.



Kuva 4. Laseranturien sijainti koetiekohteessa.

Mittaus perustuu kohteesta heijastuvien valopulssien kulku-aikaan, jonka laitteisto muuntaa jännitteeksi. Järjestelmän mittausalueen rajoiksi on säädetty 700 mm ja 3700 mm, jolloin suurin etäisyys vastaa suurinta, kymmenen voltin ulostulojännitettä ja pienin etäisyys jännitettä nolla voltia. Järjestelmä mittaa jatkuvasti tuhat näyttä sekunnissa molemmista laserantureista ja tallennus alkaa, kun ensimmäisen laserin jännite laskee alle 9,5 voltin ajoneuvon tullessa säteen eteen. Tuloksia tallennetaan kahden sekunnin ajan ja jokaiseen tulokseen liitetään aika tuhannesosasekunnin tarkkuudella. Mittausdata siirretään ja arkistoidaan tässä muodossa ja varsinaisen käsittely tehdään arkistoitujen tulosten pohjalta.

Ajotapamittausjärjestelmä kalibroitiin käyttämällä heijastavana pintana kuultomaalattua harmaata metallilevyä. Molempien mittareiden antamien lukemien vaihtelu oli erittäin vähäistä, joten niiden perusteella voitiin määrittää suorien yhtälöt, joilla mitatut jännitteet voidaan muuttaa etäisyyksiksi (Kuva 5).



Kuva 5. Lasermittareiden kalibrointikäyrät.

Laseranturien etäisyydet päällysteen reunasta ovat 0,88 ja 0,95 metriä, joten laskettaessa etäisyyksiä päällysteen reunasta käytetään taulukon 2 kalibrointikertoimia ja -vakioita.

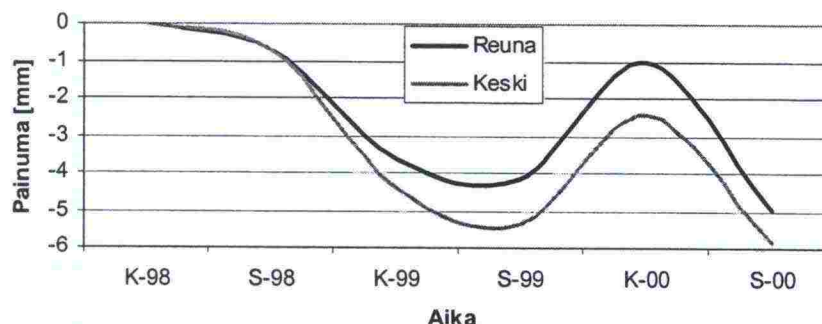
Taulukko 2. Laserantureiden ajolinjamittauksessa käytettävä kalibrointi-arvot.

	Laser 1	Laser 2
Kerroin	0,29	0,28
Vakio	0,00	-0,11

2.3 Koetien vaurioituminen

Koetiekohteen kuntoa on seurattu profilometrimittauksilla, vaaituksilla sekä inventoimalla päällysteen vauriot. Ensimmäinen vaurioseuranta tehtiin syksyllä 1998 ja viimeisin elokuussa 2000. Vaurioinventoinnin ja mittaustulosten tulkinnan on tehnyt jokaisella kerralla sama henkilö, millä on pyritty varmistamaan tulosten vertailukelpoisuus.

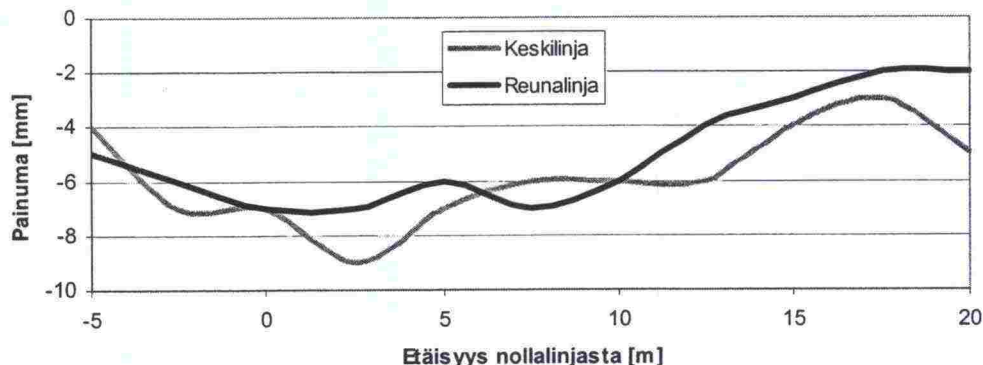
Tien pinnan keskimääräinen painuma koetiealueella määritettiin laskemalla 2,5 metrin välein tehtyjen vaaitustulosten keskiarvot erikseen tien reuna- ja keskilinjalla. Tien pinnan korkeusaseman muutos määritettiin käyttämällä vertailutasona keväällä 1998 vaaittua korkeusasemaa (Kuva 6). Syksyjen 1998 ja 1999 välisenä aikana koetiealueen keskimääräinen painuma on kasvanut 4-5 mm, mutta seuraavan vuoden aikana painuma on kasvanut vain vajaan millimetrin. Tästä voidaan päätellä, että rakenteen painuminen on ns. alkupainuman jälkeen tasoittumassa. Keväällä tehtyjen vaaitusten perusteella on vaikea tehdä johtopäätöksiä, koska korkeusasema vaihtelee talven aikana paljon routimisen vuoksi, ja korkeuserojen ollessa hyvin pieniä, mitausajankohta vaikuttaa hyvin paljon tuloksiin. Kokonaispainuma on hiukan suurempi tien keskilinjalla kuin reunalla.



Kuva 6. Koetiealueen keskimääräinen painuma tien keski- ja reunalinjalla. Nollatasona on keväällä -98 vaaittu korkeus.

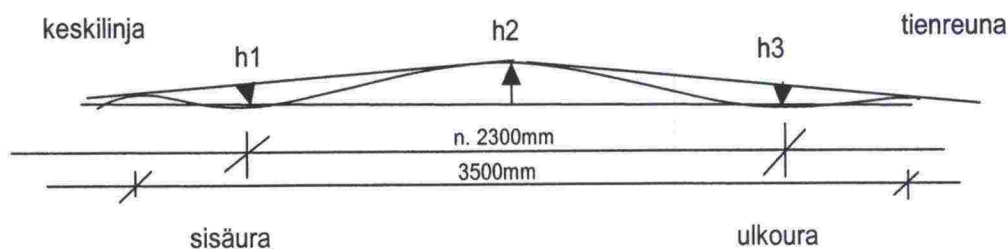
Vaaitustulosten perusteella voidaan tarkastella myös pituussuuntaisen epätasaisuuden kehittymistä (Kuva 7). Painumaerot eri vaaituspisteiden välillä ovat pieniä ja

muuttuvat tasaisesti, joten pituussuuntainen epätasaisuus on kasvanut erittäin vähän. Keskilinjalla painumaerot ovat kuitenkin suurempia kuin reunalinjalla.



Kuva 7. Painumien muutokset syksyjen 1998 ja 2000 välisenä aikana koetien keskilinjalla ja instrumentoidun kaistan reunalinjalla.

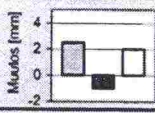
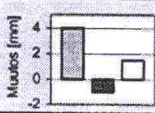
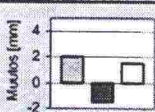
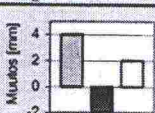
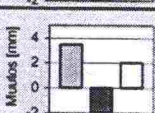
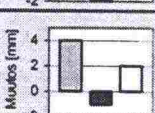
Tien urautumisella tarkoitetaan poikkisuuntaisen epätasaisuuden kehittymistä. Asvalttipäällysteisen tien urautumismekanismit voidaan jakaa neljään tyyppiin; kuluminen, plastinen deformaatio, painuminen ja tiivistyminen. Koska urautumiseen vaikuttavat monet tekijät, on eri tyyppien osuutta vaikea määrittää. Uramittaukset on tehty profilometrimittauksina koetien reuna- ja keskilinjalle viiden metrin välein asennettujen mittapulttien avulla. Profilometritulosten tulkinnassa on käytetty ns. harjannemenetelmää (Kuva 8). Urasyvyyydet h_1 ja h_2 ovat vaatuspisteiden ja kais-tan korkeimman kohdan kautta piirrettyjen suorien ja uran syvimmän kohdan etäisyyksiä. Harjanteen korkeus h_2 mitataan kohtisuorasti urien syvimpien kohtien kautta piirretyltä suoralta.



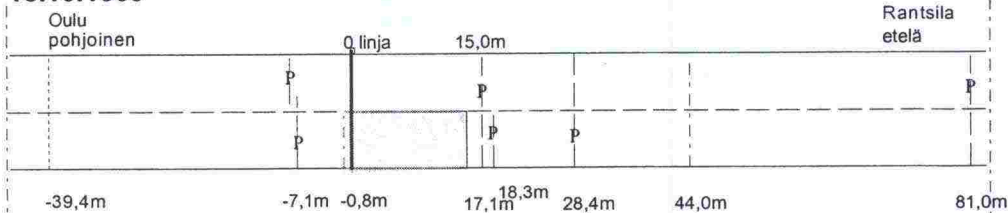
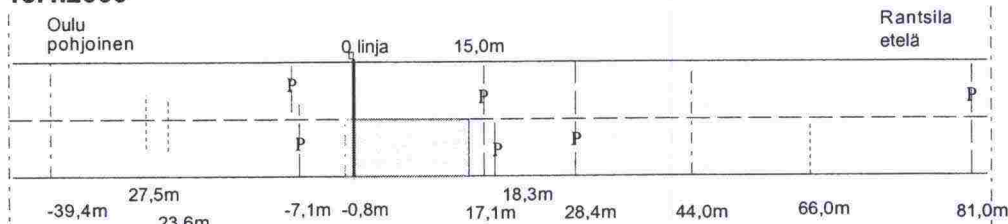
Kuva 8. Profilometrimittausten tulkinta.

Profilometrimittauksia on tehty vuoden 1998 syksystä lähtien ja viimeinen mittaus tehtiin elokuussa 2000 (Taulukko 3). Sisäuran syvyys on kasvanut kahden vuoden aikana 2-4 mm ja ulkouran syvyys 1,5-2 mm. Sisäuran syvyys on kasvanut myös talven 1999-2000 aikana, mutta ulkouran syvyys on pysynyt vakiona. Harjanteen korkeus on pysynyt suhteellisen vakiona.

Taulukko 3. Koetiekohteen urasyvyyksien ja harjanteen kehittyminen kokonaismuutokset ensimmäisen ja viimeisen mittauksen välisenä aikana.

Mittauspiste	Päivämäärä	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	Muutos [mm]
-5 m	06.10.1998	0	7.5	-2	
	18.10.1999	-1	7.5	-3.5	
	13.04.2000	-2	8	-3.5	
	24.08.2000	-2.5	6.5	-4	
Nollalinja	06.10.1998	2	7	-3	
	18.10.1999	0	8	-4	
	13.04.2000	0	8	-4	
	24.08.2000	-2	6	-4.5	
+5 m	06.10.1998	-1	7.5	-3	
	18.10.1999	-2	7.5	-4	
	13.04.2000	-2.5	8	-4	
	24.08.2000	-3	6	-4.5	
+10 m	06.10.1998	2	7	-2	
	18.10.1999	-1	7	-3.5	
	13.04.2000	-1.5	7	-3	
	24.08.2000	-2	5	-4	
+15 m	06.10.1998	1	7	-2	
	18.10.1999	-2	7	-3	
	13.04.2000	-2.5	7	-3.5	
	24.08.2000	-2.5	5	-4	
+20 m	06.10.1998	3	5	-2	
	18.10.1999	0	6	-3	
	13.04.2000	0	6	-3	
	24.08.2000	-1	4	-4	

Päällysteen vauriot on inventoitu silmämääräisesti syksyllä 1999 ja keväällä 2000 (Kuva 9). Syksyllä 1998 koko koetiealueella oli yhteensä seitsemän koko tien ylittävää sekä kaksi etelään katsottaessa oikean kaistan ylittävää poikkihalkeamaa, joista kolme oli paikattuja ja muut hiushalkeamia. Lisäksi keskisaumaa oli paikattu. Talven 2000 aikana hiushalkeamat olivat kasvaneet ja paikatat halkeamat olivat auenneet. Lisäksi oli syntynyt kolme uutta hiushalkeamaa. Instrumentoidulla alueella ei ole havaittu vielä yhtään halkeamaa.

18.10.1999**13.4.2000**

- Halkeama auki 2-3mm
- Halkeama auki 1-2mm
- Hiushalkeama
- Anturoitu alue
- P Halkeama paikattu

Keskisaumaa paikattu

Kuva 9. Päällysteen vauriot syksyllä 1999 ja keväällä 2000.

Vaikka koetien vaurioituminen on vielä erittäin vähäistä, on mittaustulosten perusteella havaittavissa tierakenteen nopeampi vaurioituminen ajokaistan sisä- kuin ulkouran kohdalta. Temmeksen alustavat ajotapamittaustulokset osoittavat, että henkilöautojen ja kuorma-autojen vasemmat pyörät noudattavat samaa ajolinjaa, jolloin sekä suurin nastarengaskulutus että raskaan liikenteen aiheuttama rakenteen deformaatio kohdistuvat samalle ajouralle. Profilometrimittausten perusteella ei kuitenkaan ollut havaittavissa päällysteen suurempaa kulumista henkilöautojen oletetun oikean pyöräuran kohdalta, joten nastarengaskulutuksella ei voida selittää kokonaan sisäuran nopeampaa kasvua.

Sisäuran ulkouraa nopeampaan kasvuun saattaa vaikuttaa myös se, että routa sulaa aikaisemmin tien keski- kuin reunalinjalta, mikä aiheuttaa tierakenteen keskelle paksumman vedellä kyllästyneen kerroksen kuin reuna-uran kohdalle. Tämä lisää raskaan liikenteen aiheuttamien rasitusten aikaansaamia pysyviä muodonmuutoksia. Asiaa käsitellään tarkemmin tässä työssä kappaleessa, jossa tarkastellaan painetulosten muutoksia roudan sulamisvaiheen aikana.

3 Aineistot ja niiden käsittely

3.1 Käsittelyn tavoitteet

Pääasiallisena aineistona tässä tutkimuksessa käytetään Temmeksen koetiekohteelta mitattuja CD-levyille arkistoituja olosuhde-, vaste- ja ajotapatuloksia. Arkistoituja mittaustuloksia on Temmeksen koetiekohteesta erittäin paljon, joten tulosten hyödyntäminen edellyttää tarkkaa aineiston rajausta ja käsittelymenetelmiä, joilla tuloksista saadaan poimittua oleelliset tiedot. Ennen laajamittaista tulosten käsittelyä täytyi selvittää tarkasti, mitä tuloksia tarvitaan ja miten ne ovat saatavissa. Tämä edellytti paljon yksityiskohtaisia mittaustulosten tarkasteluja ja erilaisia manuaalisia kokeiluja. Kun löydettiin tarvittavat "työkalut", voitiin alkaa kehittää menetelmää, jolla voidaan käsitellä suuria tietomääriä kerrallaan. Tässä yhteydessä ei kuitenkaan keskitytty valmiiden tulostenkäsittelyjärjestelmien kehittämiseen, koska ei ollut vielä tiedossa, onko niillä käyttöä tulevaisuudessa. Tarkoituksena oli löytää menettely, jolla tuloksia saatiin olemassa olevien resurssien puitteissa tarvittava määrä jatko-tarkastelujen edellyttämään muotoon.

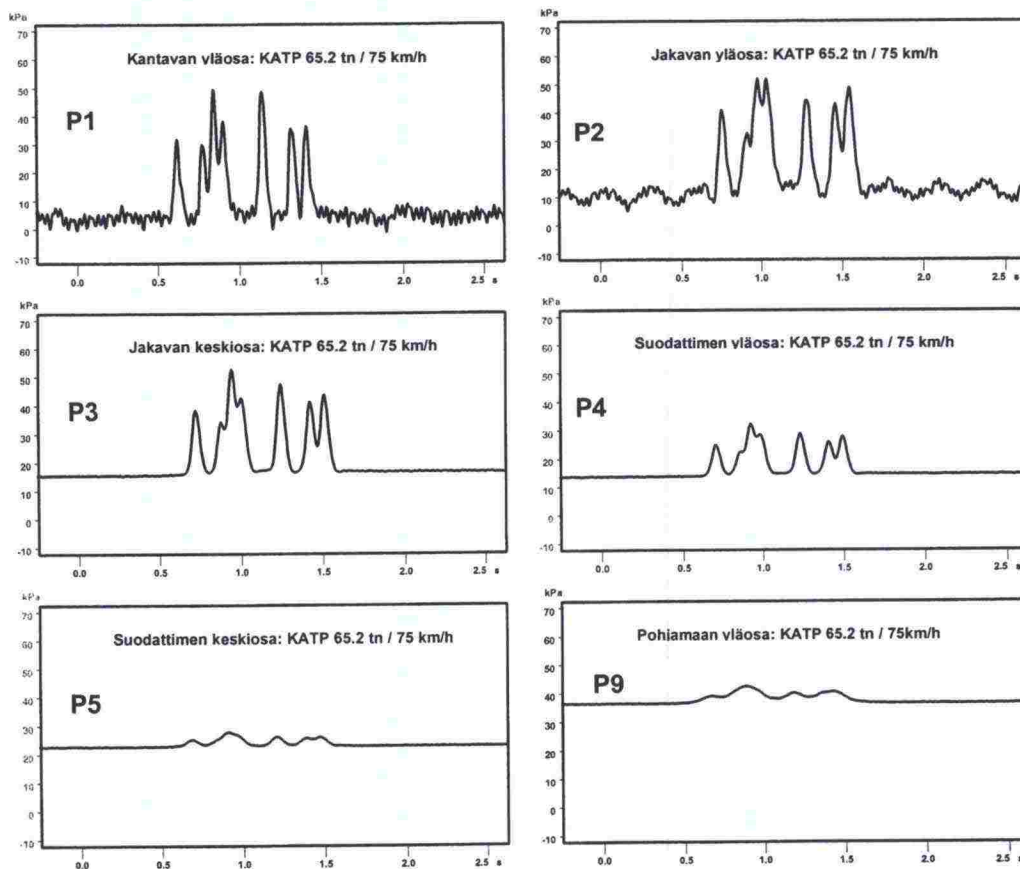
Dynaamisten akselipaineiden suuruus riippuu akselimassan lisäksi monista olosuhteisiin, ajotapaan ja ajoneuvotekniikkaan liittyvistä tekijöistä. Koska paineisiin vaikuttavia tekijöitä on paljon ja niiden vaikutukset riippuvat toisistaan, täytyi aineisto luokitella usean tekijän mukaan. Luokiteltujen tulosten perusteella tehtävät tilastolliset tarkastelut edellyttivät, että kaikkiin luokkiin saatiin mahdollisimman suuri määrä tuloksia. Arkistoitujen mittaustulosten käsittelyn tavoitteena oli siis saada kattava aineisto, jonka pohjalta oli mahdollista määrittää akselimassan aiheuttaman paineen suuruuteen vaikuttavat tekijät.

Temmeksen koetiekohteelta saatujen mittaustulosten huolella suunniteltu ja toteutettu arkistointi mahdollistaa sekä suurien tietomäärien pohjalta tehtävät tilastolliset käsittelyt että hyvin yksityiskohtaiset tarkastelut. Oikein toteutetulla tulosten suodatuksella ja käsittelyllä voidaan säilyttää tarpeelliset tiedot, joiden perusteella suodatetun aineiston tulokset ovat yhdistettävissä alkuperäiseen ns. raakadataan. Näin käsittelyn edetessä säilytetään jatkuvasti yhteys alkuperäisiin mittaustuloksiin, joten suodatusten ja tarkastelujen jälkeen tulokset ovat yhdistettävissä raakadataan, mikä mahdollistaa erilaiset tarkennukset tai pidemmälle menevät tarkastelut. Käsittelyssä käytettiin pääasiassa Temmeksessä mittaushjelmistona olevaa DasyLab -ohjelmistoa sekä Microsoft Office2000-ohjelmiston Excel-taulukkolaskenta- ja Access -tietokantaohjelmia. Lisäksi laajempiin tilastollisiin käsittelyihin käytettiin näihin suunniteltuja ohjelmistoja esim. SPSS:aa. Tulokset tallennettiin pääasiassa Access-tietokantoihin.

3.2 Painemittaustulokset

Koetierakenteessa on yhteensä yhdeksän pystysuoraa painetta mittaavaa anturia. Koska aikaa ja resursseja on käytettävissä rajoitetusti, on kerrallaan käsittelyyn otettavien tulosten rajausta välttämätöntä. Kuormitusten määrittämisessä paineiden pys-

tysuuntaisen jakautumisen tunteminen ei ole oleellista, joten tässä työssä päätettiin keskittyä yhden luotettavasti toimivan paineanturin tuloksiin. Koska tavoitteena on määrittää raskaan liikenteen kuormitukset mahdollisimman kattavasti, täytyy käsittelyyn valitun anturin mitata myös paineet, jotka aiheutuvat kaukaa anturilinjasta kulkeneista kuormituksista. Toisaalta anturin tulee kyetä erottelemaan teliakselien aiheuttamat paineet toisistaan, joten se ei voi sijaita liian syvällä tierakenteessa. Keskäaikana em. kriteerit täytti parhaiten suodatinkerroksen yläosaan sijoitettu paineanturi P4 (Kuva 10).



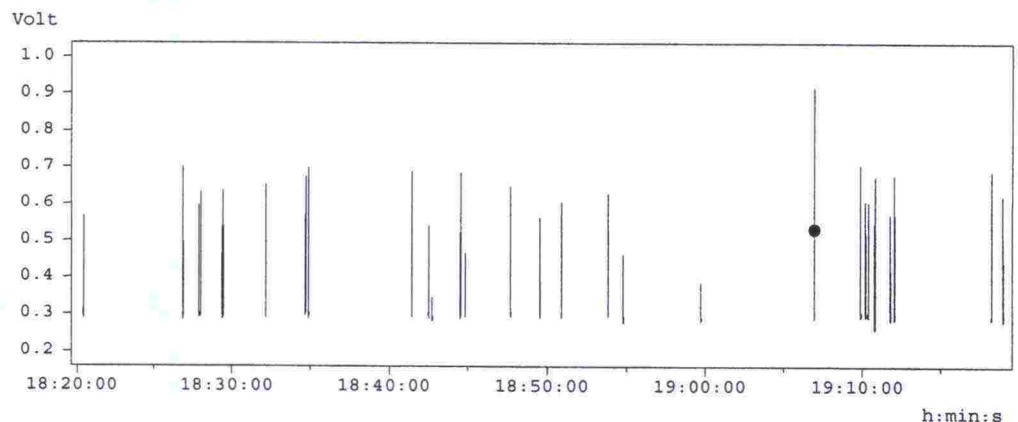
Kuva 10. Paineanturien kuormitusaika-painekäyriä. [Lämsä, 1998]

P4-anturilla mitatuissa tuloksissa kaikissa mittauksissa esiintyvä ns. taustakohina on erittäin vähäistä verrattuna mitattaviin jännitteen arvoihin. Tämä johtuu etupäässä siitä, että P4-anturin mittausalue vastaa hyvin raskaan liikenteen suodatinkerrokseen aiheuttamia paineita. Koska taustakohinan vaikutus on vähäinen, siitä yksittäisiin mittaustuloksiin aiheutuvat virheet ovat pieniä ja tulosten luotettavuus mittaustarkkuuden osalta hyvä. Tämä helpottaa tulosten käsittelyä, koska arkistoitua ns. raakadataa voidaan käyttää suoraa, ilman erillistä kohinasuodatusta. Taustakohinan vaikutus on vähäinen myös jakavan kerroksen keskiosaan asennetun paineanturin P3 tuloksissa, mutta se reagoi P4-anturia huonommin kaukaa anturilinjasta menneisiin kuormituksiin.

Käsiteltäväksi valittu P4 on suodatinkerroksen yläosaan 75 cm:n syvyyteen tienpin-nasta asennettu pystysuoraa painetta mittaava anturi. Anturi on japanilaisvalmistei-nen Kyowa BE-500GM paineanturi, jonka painealue on 50 kPa. Anturin kokonais-halkaisija on 94 mm, paksuus 18,2 mm ja paineherkän alueen halkaisija 80 mm. An-turi toimii kymmenen voltin syöttöjännitteellä. Anturi sijaitsee noin 5,5 metrin etäi-syydellä instrumentoidun alueen pohjoisreunasta ja noin 1,7 metrin etäisyydellä päällysteen reunasta. [Kilponen,1996]

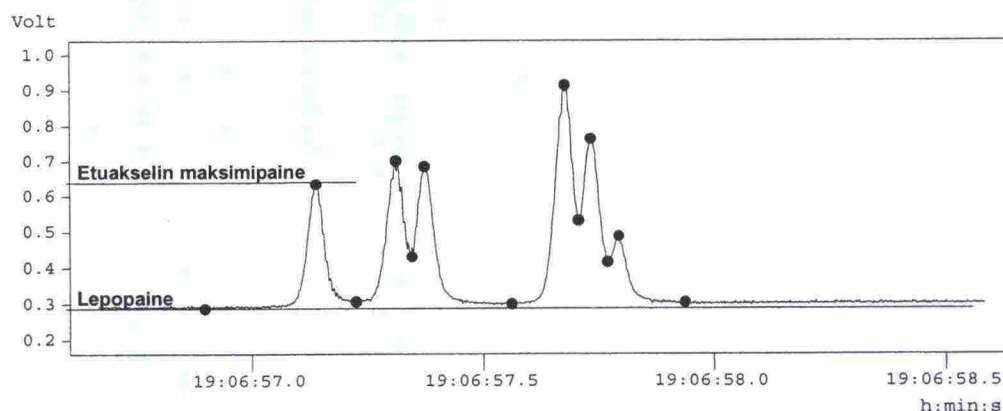
Painemittauksessa mitataan anturin antamaa jännitettä ajan funktiona. P4-anturia käytetään ns. liipaisevana anturina, joka käynnistää vastetulosten tallennuksen. Tal-lennus käynnistyy automaattisesti jännite-aika -käyrän kaarevuuden ylittäessä tietyn raja-arvon eli, kun anturin havaitsemat paineen vaihtelut kasvavat ajoneuvon lähes-tyessä. Jokaisesta ajoneuvoylityksestä mitataan jännitteen arvot mittaustaajuudella 500 Hz. P4-jännite on suoraan verrannollinen vallinneeseen pystysuoraan painee-seen kertoimella 101,2 kPa/V.

Arkistoiduista painetuloksissa on jännitteen arvoja ajan funktiona jokaisesta ajo-neuvoylityksestä noin kahden sekunnin ajalta. Kuvassa 11 on esimerkkinä yhden tunnin aikana on mitattujen hieman yli 30 ajoneuvon P4-tulokset. Vaaka-akselina on mittausaika ja pystyakselina mitattu jännite.



Kuva 11. Esimerkkikuva P4-anturin mittaustuloksista.

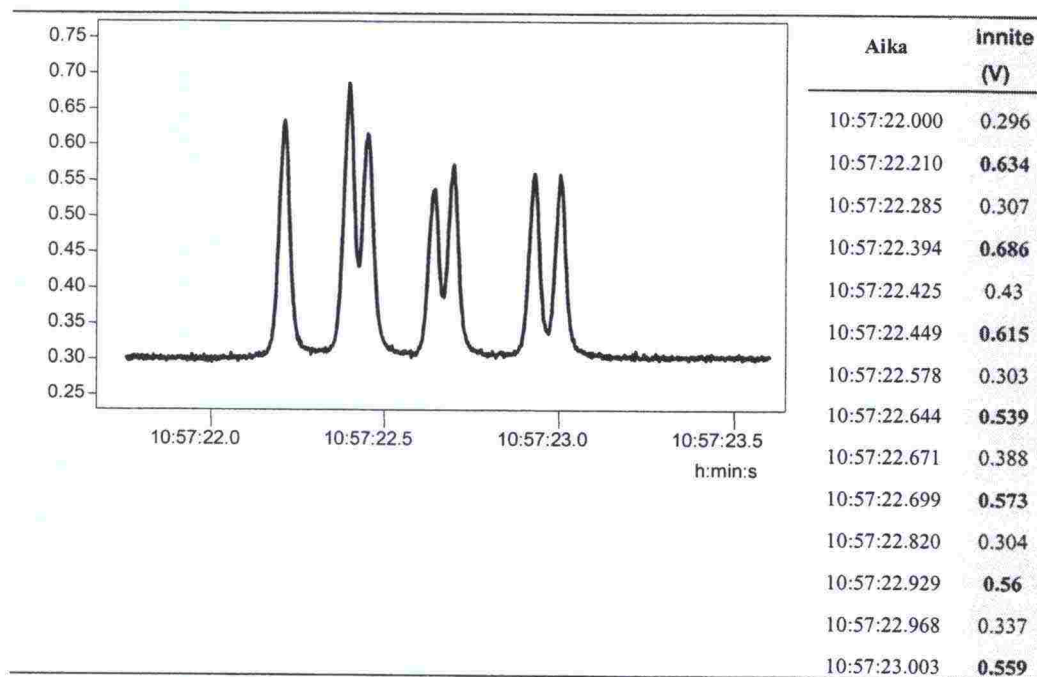
Koska arkistoiduissa P4-tuloksissa jokaista ajoneuvoylitystä kohti on 500-1000 jän-nitetulosta, on mittaustulosten suodattaminen välttämätöntä. Painetuloksista päätet-tiin ottaa mukaan jokaisen mitatun akseliylityksen aiheuttaman jännitteen maksi-miarvo, näiden väliset minimiarvot sekä niiden ajankohdat tuhannesosasekunnin tarkkuudella (Kuva 12). Näiden perusteella voidaan määrittää dynaamisten painei-den laskemiseksi tarvittavat lepopaineet, akseliylitysten aikana mitatut painemaksi-mit sekä telivaikutukset. Kellonaikojen perusteella akselipaineet voidaan yksilöidä ajoneuvo- ja akselistoryhmäkohtaisesti.



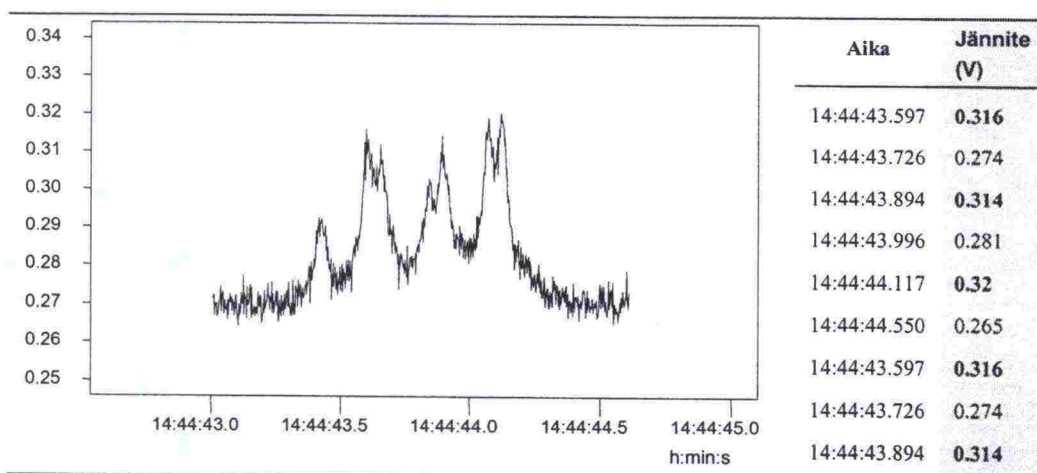
Kuva 12. Painetulosten käsittelyssä ajoneuvoylityksen aikana mitatuista P4-tuloksista määritettävät arvot. Tulokset edellisen kuvan mustalla pisteellä merkitty ajoneuvoyhdistelmä.

Arkistoitujen painetulosten käsittely aloitettiin DasyLab -mittausohjelmistolla. Alustavaan käsittelyyn otettiin yhden päivän P4-tulokset sekä kesä- että talviolosuhteista. Ajoneuvoylitysten aika-jännite -käyriltä poimittiin jännitteiden maksimi- ja minimiarvoja, joita verrattiin eri suodatusmenetelmillä saatuihin arvoihin. Näin etsittiin menetelmä, jolla saatiin määritettyä jokaisen akseliylityksen maksimi- ja näiden välinen minimijännite sekä niiden ajankohdat. Suodatusmenetelmäksi valittiin DasyLab:n Max/Min-moduuli, jolla etsitään vuorotellen jännitteen minimi- ja maksimiarvoja halutun jännitetason muutoksen jälkeen.

Min/Max-moduuli toimii erittäin hyvin sulan ajan tulosten suodatuksessa, mutta talvella ajoneuvojen aiheuttamat paineen muutokset ovat roudan vuoksi niin pieniä, että niiden erottaminen mittausjärjestelmän kohinasta on vaikeaa. Kesäaikana dynaamiset akselipaineet ovat lähes kymmenkertaisia verrattuna talvella mitattuihin vastaavan akselin aiheuttamiin paineisiin (Kuvat 13 ja 14). Roudan vaikutuksia mitattuihin P4-paineisiin käsitellään jäljempänä vuodenaikavertailun yhteydessä.



Kuva 13. Kesällä mitatun 7-akselisen ajoneuvoyhdistelmän kuormitusaika-jännite -käyrä ja Min/Max-moduulilla suodatetut tulokset.



Kuva 14. Talvella mitatun 7-akselisen ajoneuvoyhdistelmän kuormitusaika-jännite -käyrä ja Min/Max-moduulilla suodatetut tulokset.

P4-tulosten käsittelemiseksi tehtiin DasyLab-ajovirta, jossa mittausdata suodatetaan Min/Max-moduulin avulla ja tulokset tallennetaan ascii-tiedostoon kahteen sarakkeeseen. Toiseen sarakkeeseen tulostuvat akselijännitteet ja niiden väliset minimijännitteet ja ensimmäiseen näitä vastaavat kellonajat tuhannesosasekunnin tarkkuudella.

Tulosten erottelemiseksi ajoneuvoyhdistelmä- ja akseliryhmäkohtaisiksi tehtiin Microsoft Office -pohjainen käsittelymenetelmä. Menetelmässä akselijännitteet erotellaan maksimien aikojen perusteella ensin ajoneuvoyhdistelmäkohtaisesti, jolloin

saadaan päivittäinen juokseva numerointi. Ajoneuvoyhdistelmän akselit numeroidaan juoksevasti ja akseleille annetaan tunnus, joka ilmoittaa sen aseman teliryhmässä. Dynaamisia akselipaineita laskettaessa vertailutasona käytetään ajoneuvoyhdistelmän tuloksista suodatettua ensimmäistä minimin arvoa (Kuva 12). Dynaamisen akselipaine saadaan maksimi- ja lepopaineen erotuksena.

Käsittely suoritettiin yhden vuorokauden tuloksille kerrallaan ja tiedot tallennettiin Access-tietokantaan, jossa on taulukossa 4 olevan kannankuvauksen mukaiset kentät. Päivä- ja aikakenttiä ei käsittelyssä muokata, joten ne pysyvät täysin samanlaisina kuin arkistoiduissa mittaus tuloksissa. Access ei kuitenkaan tulosta sekunnin tuhannesosia, joten ne otettiin mukaan erillisenä kenttänä tarkastelujen helpottamiseksi. Tuhannesosat ovat kuitenkin mukana aikakentän tietotyypissä, joten esimerkiksi tarkasteltaessa Accessissa käsiteltyjä tuloksia uudelleen Excelissä, tuhannesosasekunnit ovat käytettävissä. Painetietojen tallennuksessa käytettiin jännitteen arvoja, jotka voidaan jatkokäsittelyn yhteydessä muuttaa helposti paineiksi.

Taulukko 4. Painemittaus tulosten käsittelyn pohjalta laaditun tietokannan kuvaus.

Kentän nimi	Tietotyyppi	Kuvaus
Päivä	Date/Time	Mittauspäivämäärä (pp/kk/vvvv)
Aika	Date/Time	Mittausaika (t:mm:ss)
1/1000_osat	Number	Mittausajan sekunnin tuhannesosat (0.000)
MAX (V)	Number	DasyLabissa suodatetut jännitteen huippuarvot (0.000)
MIN (V)	Number	Huippuarvoja seuraavat jännitteen minimiarvot (0.000)
Ajon_N:o	Number	Ajoneuvoyhdistelmien päivittäinen juokseva numerointi
Aks_N:o	Number	Akselin järjestysnumero ajoneuvoyhdistelmässä
Aks/Ajon	Number	Akselien lukumäärä ajoneuvoyhdistelmässä
Aks/Teli	Text	Ilmoittaa, onko akseli yksittäisakseli vai kuuluuko se teliin. Ilmoittaa myös järjestysnumeron telissä. (Y/T1/T2/T3)
Vert_arvo (V)	Number	Ajoneuvoyhdistelmän ensimmäistä huippuarvoa edeltävä minimiarvo, jota käytetään vertailuarvona. (0.000)
Dyn (V)	Number	Maksimi- ja vertailujännitteen erotus eli dynaaminen jännite (0.000)

Esimerkiksi kuvan 12 ajoneuvolle saatiin käsittelyssä taulukon 5 mukaiset tulokset. Kyseessä on tyypillinen kuusiakselinen puoliperävaunuyhdistelmä. Käsittelyllä on löydetty ajoneuvon kaikki kuusi akselia. Akselilukumäärää tarkasteltaessa on kuitenkin otettava huomioon, että painemittauksessa ei havaita ylös nostettuja teliakseleita, joten ajoneuvoyhdistelmässä saattaa olla todellisuudessa useampia akseleita kuin painemittausten perusteella laskettaessa. Käsittelyssä saadut akselityypit näyttävät kuvan 12 perusteella oikeilta eli vetoautossa on kaksiakseliteli ja perävaunussa kolmiakseliteli. Aikakentässä täytyy ottaa huomioon, että sekunnin tuhannesosien arvon ollessa yli 500, sekunnit pyöristyvät Accessissa ylöspäin, joten todellisuudessa kaikki akseliylitykset on rekisteröity saman sekunnin aikana.

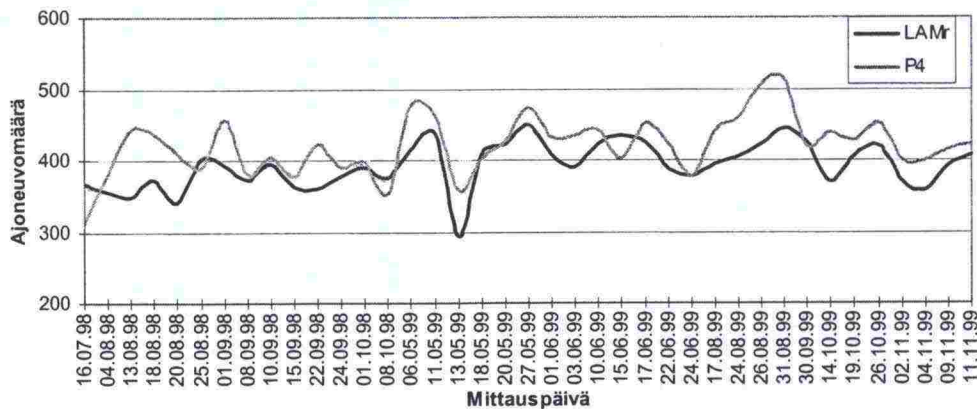
Taulukko 5. Käsittelyssä saadut tulokset kuvan 12 ajoneuvosta.

Päivä	Aika	1/1000 osat	MAX (V)	MIN (V)	Ajon N:o	Aks N:o	Aks/ Ajon	Aks/ Teli	Vert_ arvo(V)	Dyn (V)
27/7/2000	19:06:57	0.138	0.641	0.304	274	1	6	Y	0.285	0.356
27/7/2000	19:06:57	0.308	0.706	0.421	274	2	6	T1	0.285	0.421
27/7/2000	19:06:57	0.372	0.694	0.297	274	3	6	T2	0.285	0.409
27/7/2000	19:06:58	0.678	0.918	0.531	274	4	6	T1	0.285	0.633
27/7/2000	19:06:58	0.73	0.766	0.417	274	5	6	T2	0.285	0.481
27/7/2000	19:06:58	0.792	0.484	0.29	274	6	6	T3	0.285	0.199

Vuosien 1998 ja 1999 ajalta käsiteltiin tiistaiden ja torstaiden painetulokset ja kesäl-
tä 2000 kaikki mitatut P4 tulokset. Käsittelyn yhteydessä jokaiselle vuorokaudelle
tulostettiin yhteenvetotiedot päivän ensimmäisen ja viimeisen mittauksen ajankoh-
dista, ajoneuvoyhdistelmien lukumääristä, akselimääristä jne. (Liite 1). Yhteenve-
totietojen perusteella tehtiin tarkistuksia, joiden perusteella karsittiin niiden vuoro-
kausien tulokset, joissa ajoneuvojen akselimääräjakamat poikkesivat tavanomaisis-
ta.

Tierakenteen jäätyessä rakenteen jäykkyys kasvaa nopeasti, jolloin P4-paineiden
muutokset ajoneuvojen ylittäessä koetierakenteen pienenevät. Tämän vuoksi ajo-
neuvojen akseleista osa jää pois, koska käsittelyssä vaadittu paineen muutoksen ar-
vo (n. 3 kPa) jää keveimmillä akseleilla ylittämättä. Liitteen 1 kesän 2000 painetu-
lostien käsittelyiden perusteella tehdyistä vuorokausittaisista yhteenvetotiedoista
nähdään esimerkiksi lokakuun lopussa olleen pakkasjakson vaikutus painetulosten
käsittelyssä saatuihin ajoneuvojen akselimääriin. Ns. yksiakselisten ajoneuvoyhdis-
telmien määrä on suuri ja yli kuusiakselisia on hyvin vähän, joten tuloksia ei otettu
mukaan jatkokäsittelyyn. Keväällä roudan sulaessa anturin yläpuolisen rakenteen
jäykkyys laskee, jolloin ajoneuvoylityksen aikana paineen vaihtelut kasvavat. Sa-
man akseliylityksen aikana saattavat paineen vaihtelut olla niin suuria, että maksi-
min arvoja löydetään useita, minkä vuoksi ylittäneelle ajoneuvolle lasketaan enem-
män akseleita kuin niitä todellisuudessa on.

Painetulosten käsittelymenetelmän toimivuutta tarkasteltiin myös vertaamalla käsit-
telyllä saatuja vuorokausittaisia ajoneuvomäärätietoja koetiealueen eteläpuolella si-
jaitsevan liikenteen automaattisen mittauspisteen (LAM) raskaan liikenteen ajoneu-
vomääriin (Kuva 15). Valittu LAM-piste sijaitsee noin 20 km koetiekohteesta ete-
lään, mutta välissä olevilla liittymillä ei ole kovinkaan suurta vaikutusta Vt4:n ras-
kaan liikenteen määrään. LAM- ja Paine-tulosten perusteella saadut vuorokausittai-
set raskaan liikenteen ajoneuvoyhdistelmä määrät vastaavat suhteellisen hyvin toisi-
aan.



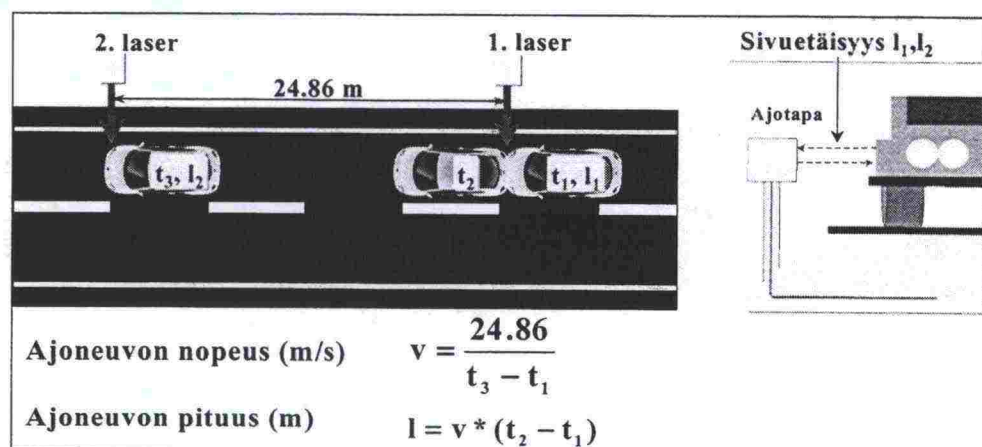
Kuva 15. Raskaiden ajoneuvoyhdistelmien lukumäärät Rantsilan Lam-pisteen ja painetulosten käsittelyllä saatujen tulosten mukaan.

Käytettäessä LAM-tuloksia vertailuaineistona on otettava huomioon kevyimpien ajoneuvojen karsiutuminen painetuloksista, kun ajolinja poikkeaa huomattavasti anturilinjasta. Toisaalta läheltä anturilinjaa ajaneiden ajoneuvojen kuormitukset aiheuttavat kaukaa menneitä suuremmat P4-paineen vaihtelut, joten myös raskaimmat pakettiautot saattavat anturin päältä kulkiessaan käynnistää tallennuksen. Voidaan kuitenkin todeta, että P4-anturilla saadaan mitattua raskaan liikenteen kuormitukset suhteellisen kattavasti ja käytetty käsittelymenetelmä toimii hyvin kesäajan P4-tulosten muokkaamisessa jatkokäsittelyn vaatimaan muotoon.

3.3 Ajotapatulokset

Laser-etäisyydenmittaukseen perustuvan ajotapamittauksen periaate esiteltiin jo edellä mittausjärjestelmän toimintaa käsittelevässä osassa. Mittauksessa tallennetaan jännitetuloksia jokaisesta ajoneuvoyhdistelmästä tuhat näytettä sekunnissa molemmilta laserantureilta ja tuloksiin liitetään kellonaika tuhannesosasekunnin tarkkuudella. Tulokset siirretään ja arkistoidaan tässä muodossa.

Arkistoitujen tulosten käsittelyssä etsitään molempien anturien liipaisuajankohdat ja lasketaan niiden erotus (Kuva 16). Ajoneuvon nopeus lasketaan liipaisuhetkien erotuksen ja anturien välisen etäisyyden perusteella. Kun ajoneuvo on ohittanut lasersäteen, palaa signaali lepotilaan. Ajoneuvon pituus määritetään paluuhetken ja liipaisuhetken erotuksen ja edellä lasketun nopeuden perusteella. Ajoneuvon ajolinja määritetään ajoneuvo-ohituksen aikana mitatun minimijännitteen perusteella. Jännite muutetaan taulukon 2 kalibrointikertoimien ja vakioiden avulla etäisyydeksi päällysteen reunasta.



Kuva 16. Ajoneuvon nopeuden, pituuden ja ajolinjan määrittäminen ajotapamittaustulosten perusteella.

Käsittely tehdään erillisellä ohjelmalla, jossa on lisäksi runsaasti erilaisia tietojen oikeellisuuteen ja luotettavuuteen liittyviä tarkistuksia. Ehtona on esimerkiksi, että molemmilta antureilta on tullava loogiset ajoneuvon nopeus- ja etäisyystulokset. Muussa tapauksessa ajoneuvon tulokset poistetaan. Ohjelmalla käsitellään kerrallaan yhden viikon arkistoidut ajotapamittaustulokset ja muodostetaan tulostaulukko, josta tiedot siirretään tietokantaan (Taulukko 6). Tietokannassa on yksi tietue ajoneuvoa kohti. Kannassa on mukana sekä raskaat että kevyet ajoneuvot.

Taulukko 6. Ajotapatietokannan kuvaus.

Kentän nimi	Tietotyyppi	Kuvaus
Pvm_Klo	Date/Time	Mittausaika (p/k/vvvv t:m:s)
Alku1	Number	Aika sekunteina ko. vuorokauden mittauksen alusta (s.000)
Loppu1	Number	Aika sekunteina ko. vuorokauden mittauksen alusta (s.000)
Etäisyys 1	Number	Ajolinja laserin 1 kohdalla (m.00)
Pituus	Number	Ajoneuvoyhdistelmän pituus (m.0)
Alku2	Number	Aika sekunteina ko. vuorokauden mittauksen alusta (s.000)
Loppu2	Number	Aika sekunteina ko. vuorokauden mittauksen alusta (s.000)
Etäisyys 2	Number	Ajolinja laserin 2 kohdalla (m.00)
Nopeus	Number	Ajoneuvoyhdistelmän nopeus (km/h.0)

3.4 Ympäristöolosuhteiden mittaustulokset

Ympäristöolosuhteiden vaihtelut muuttavat tierakenteen kantavuusominaisuuksia. Selkein paineisiin vaikuttava olosuhdetekijä on tierakenteessa olevan veden jäätyminen eli routaantuminen. Kesäaikana tärkeimmät kuormitusten aiheuttamiin paineisiin vaikuttavat olosuhdetekijät ovat bitumilla sidottujen kerrosten lämpötila ja sitomattomien rakennekerrosten kosteus. Kosteuden mittaaminen kuuluu koetiekohteissa manuaalisten mittausten piiriin eikä mittauksille ole vielä käytössä selkeää menetelmää, joten tulosten luotettavuutta ei ole voitu varmistaa. Toisaalta kesäaikana ylimpien rakennekerrosten kosteusolosuhteissa ei tapahdu suuria muutoksia, joten kosteus jätettiin pois paineisiin vaikuttavien tarkasteltavien tekijöiden joukosta.

Päällysteen jäykkyys vaikuttaa paineen jakautumiseen, joten sen vaikutus on otettava huomioon määritettäessä kuormituksia alemmista kerroksista mitattujen paineiden perusteella. Päällysteen jäykkyys riippuu pääasiassa lämpötilasta, joten päällysteestä mitattua lämpötilaa voidaan pitää hyvänä päällysteen jäykkyyttä kuvaavana tekijänä. Päällysteen toimintaan kuormituksen alla vaikuttaa myös kuormitusaika, joka riippuu ajoneuvon nopeudesta.

Lämpötilatietoja Temmeksen koetiealueelta mitataan ilmasta sekä rakenteesta eri syvyyksiltä tien keskilinjalta ja instrumentoidun kaistan reunaviivan kohdalla. Päällysteestä lämpötilaa mitataan 10 mm:n ja 90 mm:n syvyydeltä. Lämpötilat mitataan 15 minuutin välein ottaen 160 lukemaa kustakin anturista 3,2 sekunnin aikana. Lukemista lasketaan keskiarvo, joka tallennetaan lämpötila-arvoksi CD-levylle. Temmeksen ympäristöolosuhteita käsittelevän tutkimuksen yhteydessä lämpötilatuloksille muodostettiin jatkuvasti ylläpidettävä tietokanta, josta tässä työssä tarvittavat tulokset voidaan hakea. [Ryynänen, 2000]

Koska P4-anturi on poikkileikkauksessa lähempänä tien reuna- kuin keskiviivaa, valittiin lämpötila-anturi, joka sijaitsee tien reunaviivan kohdalla. Päällysteen ylä- ja alapinnan lämpötilat poikkeavat yleensä toisistaan, mutta 90 % ajasta lämpötilaero on Temmeksessä alle 2 °C. Päällysteen pintalämpötila muuttuu kesäaikana mm. ilman lämpötilan ja auringon säteilyn vaikutuksesta ja päällysteen alapinnan lämpötila seuraa pintalämpötilaa viiveellä, minkä vuoksi alapinnan lämpötilavaihtelut ovat pintalämpötilan vaihteluita pienempiä. [Ryynänen, 2000]

Pyöräkuormituksen vaikutuksesta pyörän keskikohdan alapuolelle syntyy päällysteen yläpintaan puristus- ja alapintaan vetojännitys. Lämpötilan muutos vaikuttaa päällysteessä pääasiassa bitumin lujuusominaisuuksiin, joilla on suurempi vaikutus päällysteen veto- kuin puristuslujuuteen. Päällysteen alapinnan lämpötilalla voidaan siis olettaa olevan suurempi vaikutus kuormituksen alempiin kerroksiin aiheuttamaan paineeseen kuin yläpinnan lämpötilalla. Koska päällysteen alapinnan hetkitäiset lämpötilavaihtelut ovat vähäisempiä kuin yläpinnan lämpötilavaihtelut ja alapinnan lämpötilalla on enemmän vaikutusta päällysteen kykyyn jakaa kuormituksia, valittiin päällysteen jäykkyyttä kuvaavaksi tekijäksi tien reunaviivan kohdalla 90 mm:n syvyydestä lämpötila-anturin T14 mittaama lämpötila.

3.5 Muut aineistot

Temmeksen mittausaineiston perusteella voidaan selvittää eri tekijöiden vaikutukset akselipaineisiin. Lisäksi painejakaumista voidaan määrittää tekijöitä, jotka kuvaavat tiettyjen vakiokuormitusten aiheuttamia paineita erilaisissa olosuhteissa. Jotta painetuloja voitaisiin käyttää akselimassojen määrittämiseen, täytyy löytää yhteys käytettyjen vakiokuormitusten arvojen ja staattisten akselimassojen välille. Tähän käytetään koetiealueella tehtyjen kuormitustestien ja viimeisen akselimassatutkimuksen tuloksia.

Kuormitustekijänä tässä työssä käytetään akselimassaa, jonka vaikutus suodatinkerroksen paineeseen riippuu massan suuruuden lisäksi rengastukseen, akselistoraken-

teeseen ym. ajoneuvotekniikkaan liittyvistä tekijöistä. Vuosien 1998 ja 1999 aikana tehdyssä akselimassatutkimuksessa selvitettiin kuormitusvaikutukseen liittyviä tekijöitä, kuten tietoja raskaan liikenteen ajoneuvotyypeistä, akselimassoista, akseli- ja telirakenteista yhteensä 48 mittauspaikalta eri puolelta Suomen päätieverkkoa. Jokaisessa mittauspaikassa tarkasteluun poimittiin 8 tunnin aikana otos liikennevirrasta, minkä tuloksena saatiin tiedot kaikkiaan 3587 ajoneuvosta tai ajoneuvoyhdistelmästä. Tutkimusaineistosta muodostettiin huolellisesti dokumentoitu ja tarkastettu tietokanta, johon liitettiin tietoja tutkimuspisteiden läheisyydessä sijaitsevilta LAM-pisteiltä sekä ajoneuvorekisteristä [Akselimassatutkimus, 2000]. Akselimassatutkimuksen tulokset toimivat siis hyvänä tämän hetkisen raskaan liikenteen koostumusta ja tekniikkaa kuvaavana aineistona.

Tähän tutkimukseen tilattiin tielaitoksen keskushallinnon Tiestötietoyksiköstä akselimassatutkimuksen maastotulokset, joista määritettiin esimerkiksi erilaisten rengastusten esiintymistä ja akselimassajakaumia. Näitä käytettiin mm. rengastuksen perusteella tehtävässä luokittelussa ja akselimassa-paine –yhteyden määrittäksessä.

Koetiekohteessa on tehty kuormitustestejä seitsemänä päivänä vuonna 1998 sekä laser-mittareiden testauksen yhteydessä kesällä 2000. Testeissä ajettiin koetiealueen yli kuorma-autolla vaihtelemalla kuormitusta, ajolinjaa ja nopeutta. Jokaisen kuormitusmuutoksen yhteydessä punnittiin akselimassat. Tunnetuilla akselimassoilla mitattuja painetuloksia on olemassa myös akselimassatutkimuksen yhteydessä 25. 5. 1999 tehdystä kuormitustestistä. [Sikiö, 1999]

Temmeksestä saatavien tulosten vertailuaineistoksi tilattiin Tielaitoksen keskushallinnon Tiestötietoyksiköstä liikenteen automaattisen mittausjärjestelmän (LAM) Rantsilan pisteen liikennemäärätiedot raskaan liikenteen osalta. Tutkimukseen valituilta vuorokausilta saatiin eri ajoneuvotyyppien lukumäärät tunneittain eroteltuna. Näitä käytettiin mm. tarkasteltaessa P4-tulosten käsittelyn toimivuutta ajoneuvoyhdistelmien erottelussa sekä ajotapamittauksen toimivuuden varmistuksessa.

3.6 Käsiteltyjen tulosten yhdistäminen

Tulosten käsittelyssä kaikki koetiealueelta jatkuvista mittauksista saadut tulokset tallennettiin Access-tietokantoihin ja kenttien tietotyyppien määrittelyissä pyrittiin yhdenmukaisuuteen, mikä mahdollistaa kantojen joustavan yhdistelyn ja tulosten tarkastelun. Tulosten yhdistelyllä pyrittiin saamaan kaikki tarpeelliset tiedot yhteen tietokantaan siten, että mahdollisimman suurelle määrälle käsiteltyjä painetuloksia saadaan ajotapa- ja olosuhdetiedot.

Ajotapa- ja painetietojen yhdistäminen aloitettiin etsimällä ajotapakannasta ajoneuvot, jotka ovat ohittaneet ensimmäisen lasermittarin sekunnin sisällä painemittausajankohdasta. Jos tämän kriteerin täytti useampi ajoneuvo, verrattiin ajotapakannasta saatavaa ajoneuvoyhdistelmän pituutta ja akselipainekannan akselilukumäärää ja valittiin ajoneuvo, jonka pituus vastasi akselimäärää. Tämän jälkeen ajotapa- ja painetulokset yhdistettiin siten, että jokaiseen akselipainetietueeseen liitettiin ajoneuvon nopeus, pituus ja etäisyydet päällysteen reunasta molempien laseran-

turien kohdalla. Päällysteen alapinnan lämpötilat liitettiin yhdistettyyn ajotapa- ja akselipainekantaan aikatietojen perusteella lisäämällä jokaiseen akselipainetulokseen T14-anturin tuntiämpötila.

Yhdistettyyn tietokantaan saatiin taulukon 7 kannankuvauksen mukaiset tiedot jokaiselle 12.7. ja 26.11. 2000 välisenä aikana mitatulle akselipaineelle, joille löydettiin ajotapa- ja lämpötilatulokset. Yhteensä näistä kertyi noin 113 000 akselia 22 030 ajoneuvoyhdistelmältä. Tietokanta muodostaa siis erittäin kattavan aineiston Temmeksen koetiealueen raskaasta liikenteestä, mikä mahdollistaa monenlaiset liikenteelliset ja rakenteelliset tarkastelut.

Taulukko 7. Yhdistetyn tietokannan kuvaus.

Kentän nimi	Tietotyyppi	Kuvaus
Päivä	Date/Time	Mittauspäivämäärä (pp/kk/vvvv)
Aika	Date/Time	Mittausaika (t:mm:ss)
1/1000_osat	Number	Mittausajan sekunnin tuhannesosat (0.000)
MAX (V)	Number	DasyLabissa suodatetut jännitteen huippuarvot (0.000)
MIN (V)	Number	Huippuarvoja seuraavat jännitteen minimiarvot (0.000)
Ajon_N:o	Number	Ajoneuvoyhdistelmien päivittäinen juokseva numerointi
Aks_N:o	Number	Akselin järjestysnumero ajoneuvoyhdistelmässä
Aks/Ajon	Number	Akselien lukumäärä ajoneuvoyhdistelmässä
Aks/Teli	Text	Ilmoittaa, onko akseli yksittäisakseli vai kuuluuko se teliin. Ilmoittaa myös järjestysnumeron telissä. (Y/T1/T2/T3)
Vert_arvo (V)	Number	Ajoneuvoyhdistelmän ensimmäistä huippuarvoa edeltävä minimiarvo, jota käytetään vertailuarvona. (0.000)
Dyn (V)	Number	Maksimi- ja vertailujännitteen erotus eli dynaaminen jännite (0.000)
Etäisyys 1	Number	Ajolinja laserin 1 kohdalla (m.00)
Etäisyys 2	Number	Ajolinja laserin 2 kohdalla (m.00)
Pituus	Number	Ajoneuvoyhdistelmän pituus (m.0)
Nopeus	Number	Ajoneuvoyhdistelmän nopeus (km/h.0)
T14	Number	Päällysteen alapinnan tuntiämpötila reunaviivan kohdalla

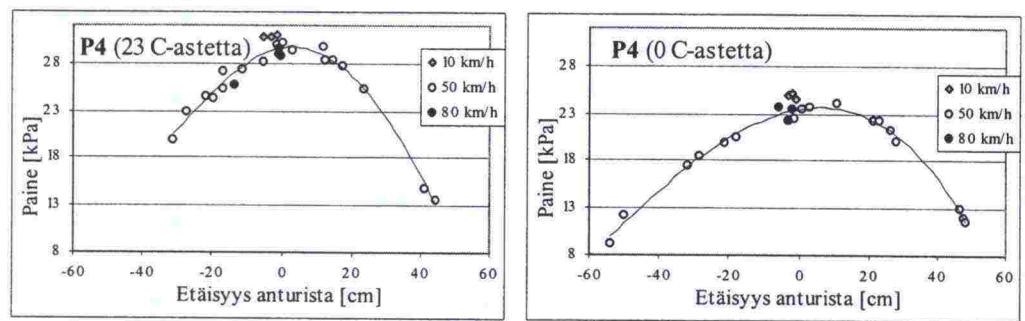
4 Suodatinkerroksen paineisiin vaikuttavat tekijät

4.1 Kuormitus

Akselipaineella tarkoitetaan tässä työssä akseliylityksen aikana mitatun maksimipaineen ja rakenteessa anturin syvyydellä vallitsevan ns. lepopaineen erotusta. Akselipaineeseen vaikuttavista tekijöistä tärkein on kuormitus, jota kuvaavana tekijänä tässä työssä käytetään akselimassaa. Saman akselimassan aiheuttama paine on kuitenkin erilainen erilaisilla rengastuksilla, mikä on otettava huomioon, kun määritetään akselimassoja tierakenteesta mitattujen paineiden perusteella. Toinen ajoneuvotekniikkaan liittyvä tekijä on ns. telivaikutus, millä tarkoitetaan kahden lähekkäin sijaitsevan akselin kuormitusten vaikutuksia toistensa akselipaineisiin. Lisäksi rengastuksella ja akselistorakenteella on merkitystä muiden tekijöiden vaikutuksiin.

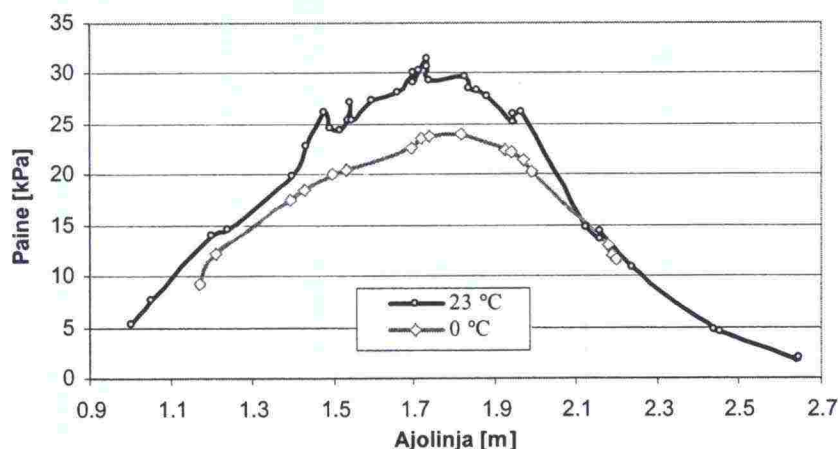
Esimerkiksi ajolinjan vaikutus akselipaineisiin on erilainen yksikköpyöräakselilla kuin paripyöräakselilla.

Kuormitukseen liittyviin tekijöihin voidaan laskea myös ajotapatekijät eli ajoneuvon nopeus ja ajolinja. Ajoneuvon nopeus vaikuttaa kuormitusaikaan, millä on merkitystä tierakenteen kuormituskäyttäytymiseen. Temmeksessä tehtyjen kuormitustestien perusteella ei ole kuitenkaan voitu osoittaa ajonopeudella olevan juurikaan vaikutusta suodatinkerroksen paineisiin (Kuva 17) [Sikiö, 1999]. Toisaalta raskaan liikenteen ajonopeudet koetiealueen kohdalla vaihteleva erittäin vähän. Raskaan liikenteen keskimääräinen hetkellinen nopeus koetien kohdalla on noin 85 km/h ja yli 80 % ajoneuvoista kulkee 80-90 km/h nopeudella.



Kuva 17. Ajoneuvon nopeuden vaikutus paineisiin suodatinkerroksessa. Kuormituskäyttäytymisenä yksikköpyörä 3500 kg. [Sikiö, 1999]

Ajolinjalla tarkoitetaan tässä työssä ajoneuvon etäisyyttä päällysteen reunasta ja sillä kuvataan kuormituksen sijaintia anturiin nähden. Ajolinjan vaikutusta on tarkasteltu vuoden 1998 aikana tehtyjen kuormitustestien tulosten perusteella ja sillä on todettu olevan selkeä vaikutus mitattuun akselipaineeseen ja vaikutus muuttuu päällysteen lämpötilan muuttuessa (Kuva 18). Ajolinjan vaikutus P4-akselipaineisiin on erilainen anturilinjalla eri puolilla, mikä saattaa johtua anturin mahdollisesta kallistumasta, rakenteen epähomogeenisuudesta tai vasemman pyörän vaikutuksesta.



Kuva 18. Ajoneuvon ajolinjan vaikutus paineisiin suodatinkerroksessa kahdella eri päällysteen lämpötilalla. Kuormituksena yksikköpyörä 3500 kg. [Sikiö, 1999]

Tarkastelemalla ajolinjan vaikutusta P4-akselipaineisiin saadaan samalla kuva kuormituksen aiheuttaman paineen jakautumisesta suodatinkerroksessa. Esimerkiksi kuvan 18 pisteiden perusteella määritettyjen käyrien voidaan olettaa kuvaavan saman kuormituksen aiheuttaman paineen jakautumista P4-anturin tasolla eri lämpötiloissa. Koska tierakenteen on siirrettävä koko tien pintaan kohdistunut kuormitus pohjamaahan, anturitasolle kohdistuu yhtä suuri paino kuin päällysteen pintaan, mutta kuormituspinta-ala on suurempi ja paineen jakautuminen erilainen. Jos oletetaan kuormituksen jakautuvan symmetrisesti kaikkiin suuntiin, voidaan kuormituksen suuruus laskea painekäyrän rajoittaman pyörähdyskappaleen tilavuutena.

Suoraa anturin päältä mennyt kuormitus aiheuttaa korkealla päällysteen lämpötilalla suuremman paineen kuin matalalla lämpötilalla (Kuva 18). Jotta painekäyrän rajoittaman pyörähdyskappaleen tilavuus olisi kaikilla lämpötiloilla vakio, täytyy jollakin ajolinjan arvolla lämpötilan vaikutuksen muuttua päinvastaiseksi eli matalammalla lämpötilalla saadaan suurempi paine kuin korkealla lämpötilalla. Tämä on yksi tärkeä lähtökohta, kun aletaan mallintaa ajolinjan ja lämpötilan vaikutuksia akselipaineisiin.

4.2 Routa

Kuormituksen lisäksi tierakenteesta mitattuihin akselipaineisiin vaikuttaa tarkastelutason yläpuolisen rakenteen jäykkyys eli kyky jakaa kuormituksia. Tärkein rakenteen jäykkyyteen vaikuttava tekijä koetialueella on rakenteessa olevan veden jäätyminen eli routaantuminen. Routaantuminen aiheuttaa pääasiassa sitomattomien kerrosten huomattavan jäykkyyden kasvun, mikä havaittiin myös painetulosten käsittelyn yhteydessä. Mitatut P4-akselipaineet olivat huomattavasti pienempiä talvi- kuin kesäaikana (Kuvat 13 ja 14). Aiemmissa tutkimuksissa on esimerkiksi todettu, että liikennesäätöjen merkitys jäätynneeseen tierakenteeseen on niin vähäinen, että

se voidaan tekemättä suurtakaan virhettä jättää tierakenteen kestoikä tarkasteluista pois kokonaan. [Ehrola, 1996]

Roudan sulaessa tierakenteen vesipitoisuus kasvaa, mikä heikentää sen kantavuutta. Karkearakeisilla materiaaleilla vesipitoisuuden muutoksilla ei ole suoranaisesti kovinkaan suurta vaikutusta kitkakulmaan, mutta liikennekuormitus aiheuttaa vedellä kyllästettyyn rakennekerrokseen liikkuvan paineaallon, joka saa aikaan suuria hydrostaattisia huokosvedenpaineita. Koska huokosvedenpaineen kasvu pienentää maa-kerroksen leikkauslujuutta, kantavan ja jakavan kerroksen kantavuus heikentyy tällaisessa tilanteessa huomattavasti, mikä aiheuttaa rasi- ja rasitusten kasvun alemmissa kerroksissa. [Ehrola, 1996]

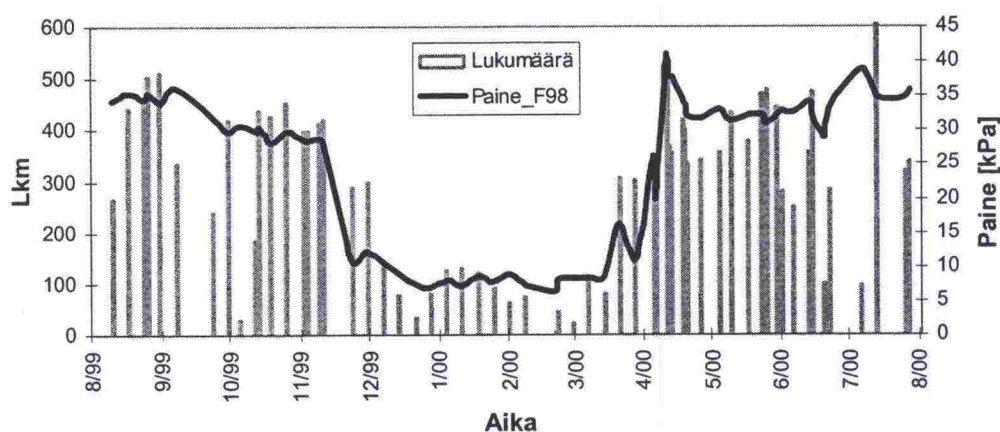
Temmeksien koetierakenteen sulaminen keväällä tapahtuu nopeasti ja etenee pääasiassa ylhäältä päin. Tien poikkisuunnassa roudan sulaminen alkaa aikaisemmin ja sulamisen eteneminen on nopeampaa tien keskilinjalla kuin reunalinjalla. Sulamisprosessi ei etene tierakenteessa tasaisesti vaan samalta tasolta mitattu lämpötila käy sulamiskauden aikana useita kertoja 0°C:n ylä- ja alapuolella. [Ryynänen, 2000]

Tässä työssä roudan vaikutuksia P4-akselipaineisiin tarkasteltiin ennen ajotapamittausten aloittamista saatujen tulosten perusteella. Kuten P4-tulosten käsittelyä kuvaavassa osassa esitettiin, dynaamiset akselipaineet laskevat suodatinkerroksessa talviaikana erittäin alhaiselle tasolle. Tämän vuoksi on talvella mitattujen P4-tulosten perusteella vaikeaa erotella ajoneuvoyhdistelmän akselien aiheuttamat paineet toisistaan. Ainoastaan etuakselien aiheuttamat paineet ovat talven tuloksista suhteellisen hyvällä tarkkuudella eroteltavissa, joten käsittelyyn otettiin vain etuakselit. Toisaalta alhaisilla paineilla tulevat vastaan anturin mittausalueen rajat, jolloin painejakauman alapäästä karsiutuvat keveimpien ajoneuvojen aiheuttamat paineet pois, minkä vuoksi P4-tulosten perusteella on vaikeaa vertailla talviajan tuloksia muina aikoina mitattuihin tuloksiin.

Talven 1999-2000 tulokset käsiteltiin samalla menetelmällä kuin kesäajankin tulokset ja koottiin tietokantaan, josta poimittiin etuakselien aiheuttamat paineet. Nämä yhdistettiin syksyn 1999 ja kevään 2000 tuloksista poimittujen etuakselien tulosten kanssa ja paineille määritettiin vuorokausittaisia tilastollisten tunnuslukujen arvoja sekä mitattujen etuakselipaineiden lukumäärät. Käytettäväksi tunnusluvuksi valittiin fraktiili, joka tarkoittaa muuttujan arvoa, jonka alittaa haluttu prosentuaalinen määrä tuloksista. Tässä työssä käytetään fraktiileille lyhennettä $F_{\#}$, jossa $\#$:lla merkitään sitä prosenttilukua, jota vastaavaa fraktiilia tarkoitetaan. Esim. paineiden F_{98} tarkoittaa paineen arvoa, jota pienempiä tuloksia on 98 prosenttia otoksen tuloksista.

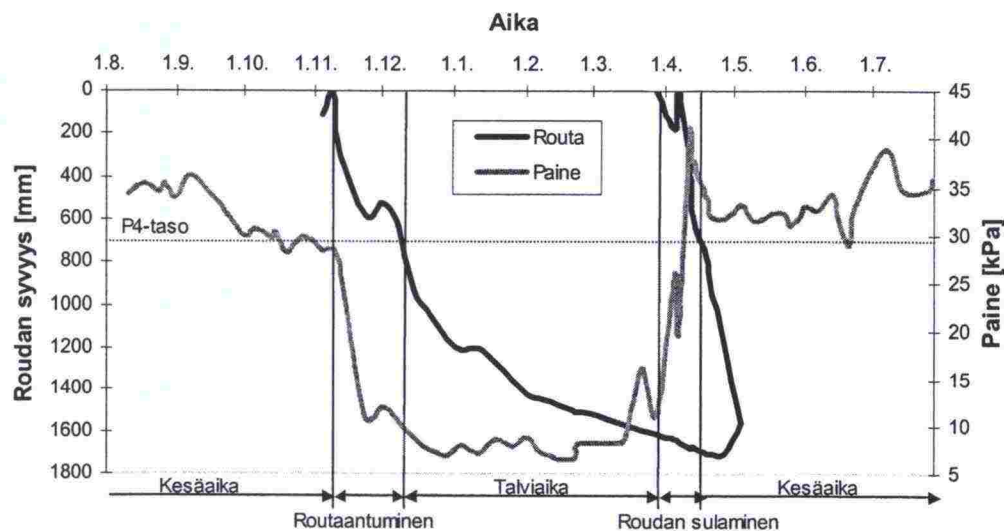
Kun käytetään suurta fraktiilin arvoa, voidaan olettaa sen vastaavan yhtä suuren akselimassan aiheuttamaa painetta eri päivinä. Suurimmat päivittäiset paineet mitataan yleensä anturilinjalta, joten ajolinjan vaikutus tuloksiin on vähäinen. Etuakselimassat eivät vaihtelee huomattavasti käsiteltyjen vuorokausien välillä, joten käyttämällä kertymäkäyrän yläpään arvoa, voidaan hyvällä tarkkuudella olettaa määritettyjen paineen arvojen vastaavan saman kuormituksen aiheuttamaa painetta ja muutosten johtuvan rakenteen jäykkyyden muutoksista.

Päivittäin havaittujen ajoneuvojen lukumäärät pienenevät huomattavasti talven aikana, mikä johtuu kevyempien ajoneuvojen jäämisestä pois, koska niiden aiheuttamat paineen muutokset eivät käynnistä tallennusta (Kuva 19). Kesäaikana tapahtuneet päivittäisten ajoneuvomäärien rajut laskut johtuvat mittaustietokoneiden "kaatumisesta" sähkökatkon tai ylikuumentumisen vuoksi.



Kuva 19. Etuakselilylyksistä mitattujen P4-paineiden päivittäiset lukumäärät ja F98:ä vastaavat arvot syksystä 1999 kesään 2000.

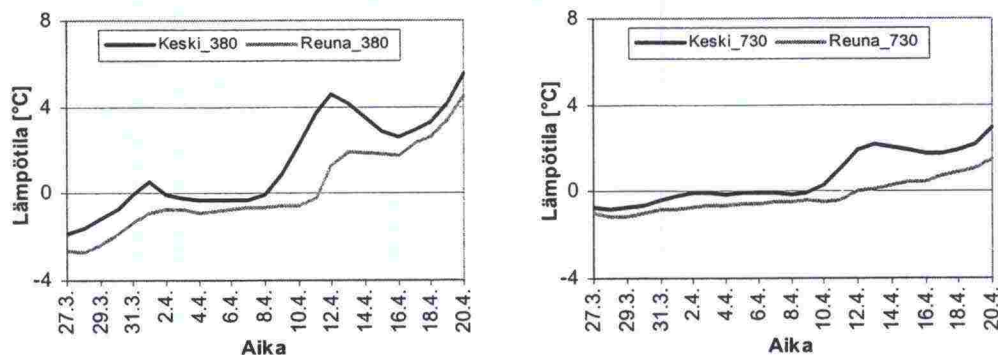
Päivittäisistä etuakselipaineista määritettyjen F98:n muutokset osoittavat selkeästi tierakenteen jäätymisen vaikutukset akselipaineisiin (Kuva 20). Kesällä päivittäisten etuakselipaineiden F98 on noin 35 kPa ja laskee syksyn edetessä 30 kPa:n tasolle päällysteen lämpötilan laskiessa. F98 pienenee nopeasti samaan aikaan, kun routa etenee anturin yläpuolisessa rakenteessa. Kun roudan syvyys saavuttaa anturitason, paine vakioituu 5 ja 10 kPa:n välille, eikä roudan syvyyden eteneminen enää juurikaan vaikuta paineisiin.



Kuva 20. Etuakselilyityksistä mitattujen P4-paineiden päivittäiset F98:a vastaavat arvot ja roudan syvyys tien reunalinjalla.

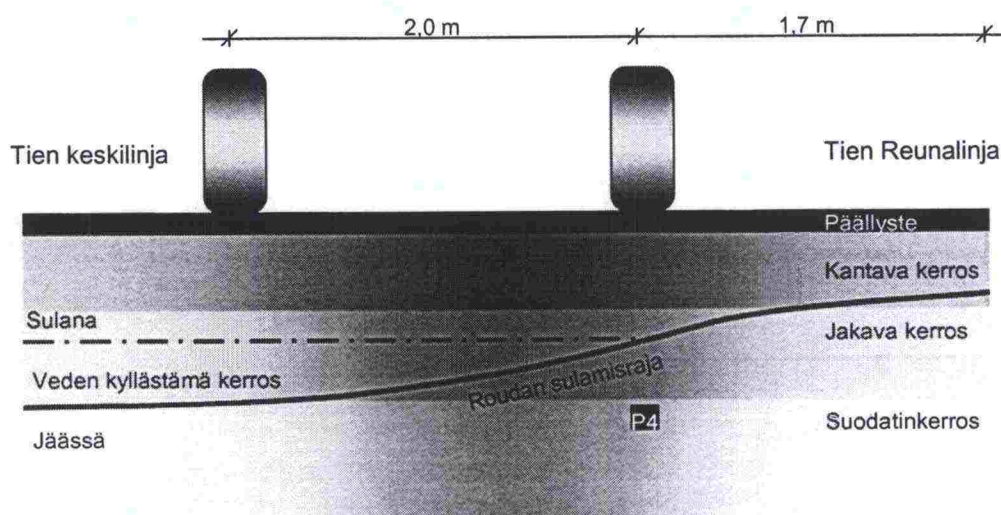
Tierakenteen routaantumisen mukaan vuosi voidaan jakaa P4-paineiden kannalta neljään vaiheeseen (Kuva 20). Routaantuminen alkaa, kun päällysteen lämpötila laskee pysyvästi nollan alapuolelle ja jatkuu, kunnes routaraja saavuttaa anturitason. Tänä aikana vuorokausittaisten akselipaineiden F98 pienenee nopeasti. Talviaikana akselipaineissa ei tapahdu suuria muutoksia, vaikka roudan eteneminen jatkuu alemmissa rakennekerroksissa. Keväällä roudan sulaminen tapahtuu tierakenteen pinnasta päin erittäin nopeasti ja sulaminen etenee P4-anturin syvyydelle (n. 700 mm) vajaassa viikossa. Vuorokausittaisten akselipaineiden F98 alkaa kasvaa nopeasti heti, kun tierakenne alkaa sulaa ja suurimmat paineet mitataan, kun routa on sulanut P4-anturin yläpuolelta. Kesäaikana akselipaineiden F98 vaihtelee 30 ja 40 kPa:n välillä.

Keväällä 2000 suurimmat akselipaineet on mitattu 11.4. Samana ajankohtana roudan sulaminen tien reunalinjalla on edennyt noin 400 mm:n syvyyteen ja keskilinjalla routa on sulanut jo kokonaan anturitason yläpuolelta (Kuva 21). Roudan sulaminen tien keskilinjalta aikaisemmin kuin reunalinjalla saa aikaan tierakenteeseen kourun, josta vesi ei pääse valumaan pois. Tämän seurauksena syntyy rakenteeseen vedellä kyllästynyt kerros, missä liikennekuormitukset saavat aikaan hydrostaattisen huokosvedenpaineen hetkellisiä kohoamisia, jolloin kerroksen leikkauslujuus pienenee ja kantavuus heikkenee.



Kuva 21. Lämpötilat 380 ja 730 mm:n syvyydellä tien keski- ja reunalinjalla.

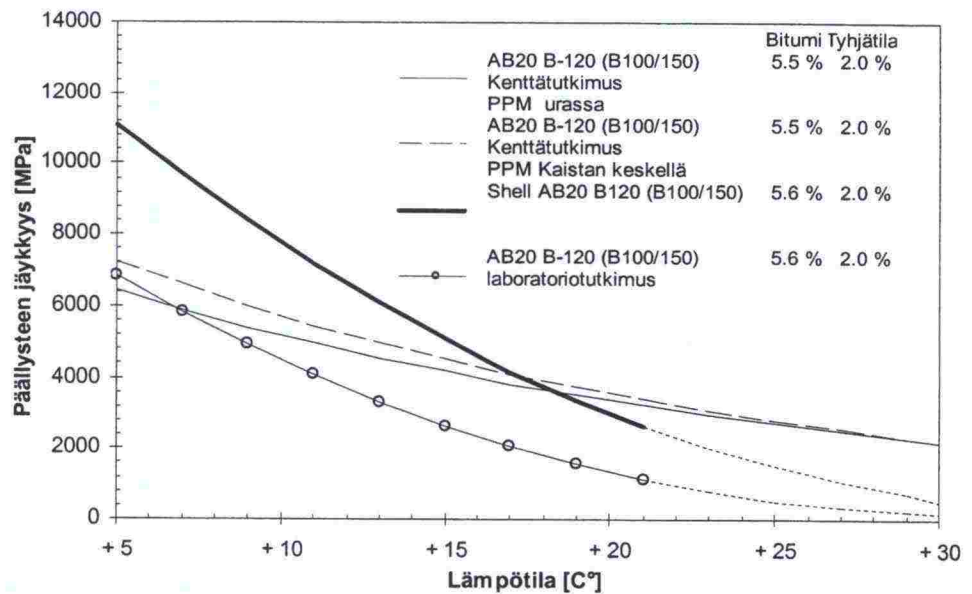
Roudan sulaessa mitatut P4-paineet eivät kuitenkaan kasva kovin suuriksi vaan vastaavat lähes paineita, joita mitataan korkeilla päällysteen lämpötiloilla kesäaikana (Kuva 20). Tämä saattaa johtua siitä, että vedellä kyllästynyt kerros jää P4-anturin kohdalla (n.1,7 m reunalinjasta) suhteellisen matalaksi, joten sen vaikutus rakenteen kokonaiskantavuuteen on vähäinen. Roudan sulaminen tien keskilinjalta alkaen aiheuttaa sen, että vedellä kyllästyneen rakennekerroksen paksuus on keskempänä suurempi kuin reunalla, minkä vuoksi tierakenteen kantavuus on keväällä pienimmillään tien keskilinjalla (Kuva 22). Myös vaakasuuntainen tuki on tien reunalla parempi kuin keskilinjalla, joten saman kuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset ovat suurempia keskiuran kohdalla. Tämän vuoksi keväällä tapahtuvan vaurioitumisen kannalta vasen pyöräura näyttäisi muodostuvan poikkileikkauksen mitoittavaksi linjaksi korkealuokkaisilla teillä.



Kuva 22. Tierakenteen olosuhteet roudan sulamisen aikana.

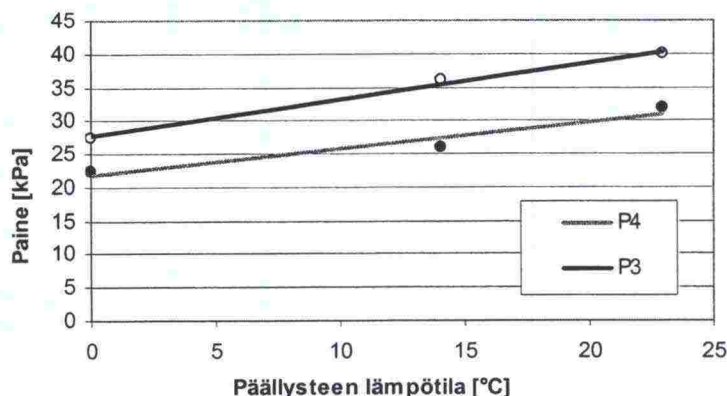
4.3 Päällysteen lämpötila

Kun routa ei vaikuta tierakenteeseen, tärkein kuormitus-painesuhteeseen vaikuttava olosuhdetekijä on päällysteen lämpötila. Päällysteen lämpötilan kohoaminen aiheuttaa bitumin ja samalla päällysteen jäykkyyden laskun, mikä lisää kuormituksen muihin rakennekerroksiin aikaansaamaa rasitusta. Päällysteen jäykkyyden lämpötilariippuvuuteen vaikuttavat monet mm. päällysteen koostumukseen ja ikään liittyvät tekijät. Päällysteen lämpötilalla on kuitenkin todettu olevan suuri merkitys päällysteen jäykkyyteen (Kuva 23). [Ehrola, 1996]



Kuva 23. Eri tavoilla määritettyjä asfalttipäällysteen jäykkyyden lämpötilariippuvuutta kuvaavia käyriä. [Ehrola, 1996]

Vuoden 1998 kuormitustesteissä havaittiin päällysteen lämpötilan vaikutuksen olevan lineaarista (kuva 24) [Sikiö, 1999]. Oletus perustuu kuitenkin suhteellisen suppean aineiston käsittelyyn.



Kuva 24. Päällysteen lämpötilan vaikutus suodatin- ja jakavan kerroksen akselipaineisiin vuonna 1998 tehtyjen kuormitustestien perusteella. [Sikiö, 1999]

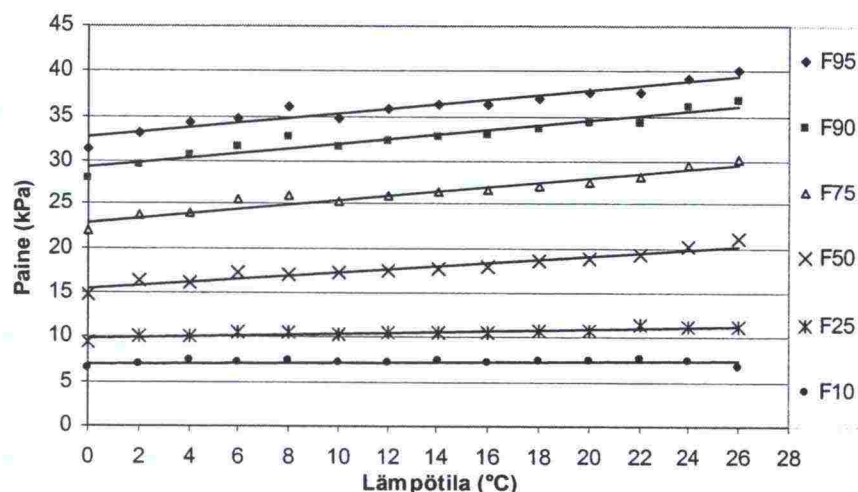
Lämpötilan muutoksilla ei ole sulan aikana merkittävää vaikutusta sitomattomien kerrosten kantavuusominaisuuksiin ja toisaalta lämpötilavaihtelut pienentyvät mentäessä syvemmälle rakenteeseen. Tämän vuoksi voidaan olettaa saman kuormituksen aiheuttaman paineen muutoksen eri lämpötiloissa johtuvan päällysteen jäykkyyden muuttumisesta.

Päällysteen lämpötilan vaikutuksia tarkasteltiin alustavasti vuosien 1998 ja 1999 sulan ajan tiistaiden ja torstaiden aikana mitattujen painetulosten perusteella. Tällöin ei ollut vielä käytettävissä ajotapatietoja, mikä oli otettava huomioon tuloksia tulkittaessa. Eri kesien aikana mitatuissa akselipaineissa ei ole vielä havaittavissa rakenteen vaurioitumisesta johtuvia eroja, joten tulosten voidaan olettaa vastaavan toisiaan. Tulokantaan saatiin em. rajauksilla hieman alle 150 000 akseliylityksen aiheuttamat paineet, joille määritettiin mittaushetken lämpötilat käyttämällä tien reunaviivan kohdalta mitattuja päällysteen alapinnan tuntiämpötiloja.

Tulokset jaettiin päällysteen lämpötilojen mukaan kahden asteen lämpötilaluokkiin. Käsittelyn lähtökohtana oli, että laajan aineiston pohjalta jokaiseen lämpötilaluokkaan saatiin niin paljon havaintoja, että eri luokkien kuormitus- ja ajolinjakakaumien voidaan olettaa vastaavan toisiaan. Lämpötilaluokkien välillä ei raskaan liikenteen määrissä tai koostumuksessa ole suuria eroja. Korkeita lämpötiloja mitataan vain päivällä, mutta muihin luokkiin tulee mukaan myös yön tuloksia. Akselimassojen lämpötilaluokittaisiin jakaumiin tällä tuskin on merkitystä. Matalien lämpötilojen tulokset painottuvat jonkin verran keväälle, mikä aiheuttaa hieman painetason nousua alle 10 °C lämpötilaluokissa.

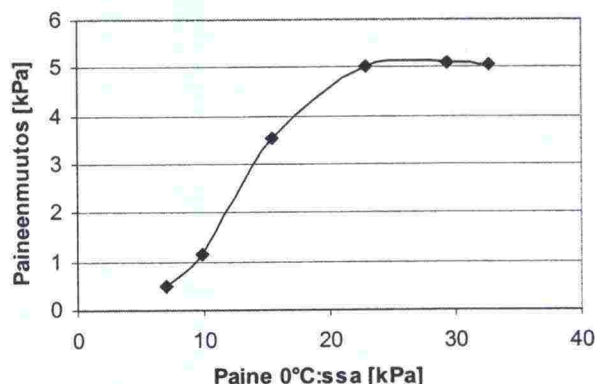
Luokitelluille paineille määritettiin akselipainejakaumat ja niiden perusteella fraktiileja F10, F25, F50, F75, F90 ja F95 vastaavat arvot, joilla pyrittiin kuvaamaan eri suuruisten akselimassojen aiheuttamia paineita. Lämpötilan vaikutusta akselipaineisiin tarkasteltiin eri fraktiilien ja lämpötilaluokkien keskipisteiden välisten hajontakuvioiden avulla (Kuva 25). Pisteiden hajonta saman fraktiilin arvoilla on hyvin vähäistä, joten voidaan olettaa, että muiden ympäristötekijöiden vaikutus kuormitusten aiheuttamiin paineisiin on kesäaikana erittäin vähäinen. Alhaisissa lämpötilaluokis-

sa paineiden poikkeama johtuu pääasiassa siitä, että mukana on myös roudan sulamisajan tuloksia. Paineiden lämpötilariippuvuus on lähes lineaarista samaa fraktiilia vastaavilla paineen arvoilla, mutta muutosnopeus eli regressiosuoran kulmakerroin vaihtelee fraktiilien välillä.



Kuva 25. Lämpötilan perusteella luokiteltujen painetulosten fraktiilipisteiden ja lämpötilan väliset hajontakuviot.

Kuvan 25 regressiosuorien kulmakerrointen eroja tarkasteltiin vertaamalla saman lämpötilamuutoksen vaikutuksia paineeseen eri fraktiilien arvoilla (Kuva 26). Lämpötilamuutoksen vaikutus kasvaa nopeasti painetason kasvaessa ja 20 asteen lämpötilamuutoksen vaikutus paineisiin vakioituu noin 5 kPa:n tasolle F75:a vastaavan arvon jälkeen. Syynä kulmakerrointen eroihin on pienten painetulosten painottuminen suurien sivusiirtymien arvoille, joilla lämpötilamuutoksen vaikutus on vähäinen (vrt. kuva 18). Ajolinjalla ja lämpötilalla näyttäisi siis olevan selkeä yhteisvaikutus paineisiin eli ajolinjan poiketessa huomattavasti anturilinjasta lämpötilalla on selkeästi vähemmän vaikutusta paineisiin kuin suurilla fraktiilin arvoilla vastaavilla tuloksilla, jotka on saatu ajolinjan ollessa lähellä anturilinjaa. Ajolinjan ja päällysteen lämpötilan yhteisvaikutuksia käsitellään tarkemmin kesän 2000 tulosten pohjalta tehtävän mallinnuksen yhteydessä.



Kuva 26. Paineen muutos päällysteen lämpötilan muuttuessa nollasta 20 °C:een eri fraktiilien arvoilla.

5 Akselimassojen määrittäminen

5.1 Lähtökohdat

Temmeksen koetiejärjestelmää ei ole suunniteltu eikä tarkoitettu käytettäväksi WIM-vaakana (Weight-In-Motion), mutta painetulosten tarkasteluissa on tullut esiin mahdollisuus määrittää paineen aiheuttaneen akselin massa. Jos tulosten perusteella voitaisiin määrittää kuormituksen suuruus riittävällä tarkkuudella, saataisiin tierakenteen toiminnan tarkastelun pohjaksi yksi erittäin olennainen lisätekijä, kun tiedetään vasteiden ja kuormituksen sijainnin lisäksi kuormituksen suuruus. Akselimassojen tunteminen antaa hyvän pohjan esimerkiksi kuormitusvastaavuuksien tarkasteluun.

Tavoitteena oli päästä eurooppalaisen tutkimusyhteisöelimen COST-323:n automaattisten akselivaakojen luokituksen luokkaan B(10), jolloin järjestelmän tarkkuus riittäisi yksityiskohtaisen tiedon keräämiseen liikenteestä. COST-323:n vaatimukset järjestelmän antamien tulosten toleranssille ovat erilaiset riippuen esimerkiksi siitä tarkastellaanko yksittäisakseleita, teliryhmiä vai ajoneuvojen kokonaismassoja. Tulosten prosentuaalinen määrä, jonka pitää olla toleranssin rajoissa riippuu testausmenetelmästä ja sen toistettavuudesta. Jos testiaineistona käytetään koetiealueella tehtyjen kuormitustestien tuloksia, tulee yksittäisakselien massojen poikkeamien punnituista staattisista akselimassoista olla 93,9 %:ssa tuloksista pienempiä kuin 15 %. [Halonen, P. ym., 1993, Jacob, B., 1998]

Temmeksen koetiekohteessa mitattaviin reaaliliikenteen aiheuttamiin rasituksiin vaikuttaa akselin staattisen painon lisäksi kuormittavan pyörän pystysuorasta liikkeestä aiheutuva dynaaminen kuormitus. Dynaamisen kuormituksen suuruus riippuu tien epätasaisuudesta, ajoneuvon jousituksesta, telirakenteesta, ajonopeudesta jne. Dynaamisen akselipainon suuruus voi vaihdella tasaisellakin tiellä $\pm 20\%$ verrattessa staattiseen akselipainoon. [Halonen, P. ym., 1993, Huhtala, M., 1994]

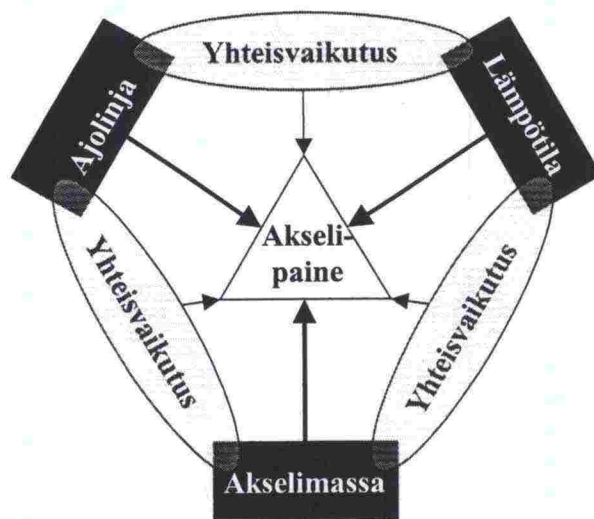
Dynaamiset kuormitukset vaihtelevat kuitenkin suhteellisen tasaisin väliajoin. Samalla nopeudella ajettaessa saman ajoneuvojen etuakselin dynaamisen kuormituksen on todettu olevan samassa vaiheessa eli kuormitushuiput saavutetaan samoissa pisteissä eri ylityskerroilla [Pihlajamäki, 1993]. Saman akselin dynaamisten akselipainojen huippuarvot saavutetaan samalla taajuudella myös riippumatta tien tasaisuudesta [Halonen, P. ym., 1993].

Akselimassojen määrittämiseksi tehtävien tarkastelujen pohjana käytettiin kesän 2000 aikana mitattuja tuloksia, joissa on mukana ajotapatiedot. Yhdistettyyn tulokantaan saatiin yhteensä yli 22 000 raskaan ajoneuvon tai ajoneuvoyhdistelmän tiedot. Vertailutuloksina käytettiin viimeisen akselimassatutkimuksen ja koetiealueella tehtyjen kuormitustestien tuloksia.

Akselimassojen määrittäminen edellyttää ympäristö- ja ajotapatekijöiden vaikutusten mallintamista. Tarkastelu on siis periaatteessa kaksisuuntainen eli mittaamalla tierakenteen rasitukset ja olosuhdetekijät voidaan määrittää kuormitukset ja samalla selvitetään kuormitusten ja olosuhteiden vaikutusta rasituksiin. Menetelmiä voidaan käyttää soveltaen myös muiden koetiealueen antureiden tulosten käsittelyyn.

Koska erilaisten rengastusten ja telirakenteiden akselimassa-paine yhteydet eroavat toisistaan, käsittely jaettiin rengastuksen ja telirakenteiden osalta alustavasti kolmeen osaan; yksikköpyörillä varustettuihin yksittäisakseleihin, paripyörillä varustettuihin yksittäisakseleihin ja paripyörillä varustettuihin teliakseleihin. Helpoimmin tuloksista olivat eroteltavissa yksikköpyörillä varustetut yksittäisakselit, joita edustavat ajoneuvoyhdistelmien etuakselit. Tämän vuoksi käsittelyyn otettiin aluksi etuakselien tulokset ja kehitettiin niiden pohjalta käsittelymenetelmä, joka on tietyin edellytyksin sovellettavissa muille akseli- ja rengastustyypeille.

Akselimassojen ja niiden aiheuttamien akselipaineiden suhteeseen vaikuttavat voimakkaasti sekä ympäristöolosuhteet että ajoneuvon ajolinja. Kuten roudan vaikutuksia käsittelevässä osassa esitettiin, roudan vaikutus P4-paineisiin on erittäin suuri ja vaikeasti määritettävissä, joten tässä työssä keskityttiin sulan ajan tulosten tarkasteluun. Kesäaikana Temmeksen koetiekohteessa tärkein akselimassan aiheuttamaan P4-akselipaineen suuruuteen vaikuttava ympäristötekijä on päällysteen lämpötila (Kuva 27). Kuormitustekijöistä akselimassan lisäksi paineisiin vaikuttaa pääasiassa kuormituksen sijainti, jota tässä työssä kuvataan ajoneuvon etäisyydellä päällysteen reunasta eli ajolinjalla. Päällysteen lämpötilalla ja ajolinjalla on olemassa myös selkeä yhteisvaikutus. Lisäksi akselimassan suuruudella saattaa olla merkitystä päällysteen lämpötilan ja ajolinjan vaikutukseen.



Kuva 27. Käsittelyyn valitut akselipaineisiin vaikuttavat tekijät.

5.2 Akselimassojen määrittäksen periaatteet

Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti periaate, jolla akselimassojen määrittäminen tehtiin. Määrittäminen jaetaan osavaiheisiin ja kerrotaan lyhyesti, mitä eri vaiheissa pyritään saavuttamaan. Jatkossa selvitetään esimerkkien avulla tarkemmin, miten tuloksia eri vaiheissa käsiteltiin ja perustellaan eri menetelmien ja oletusten käyttöä.

Kuormitusten määrittäminen tierakenteesta mitattujen paineiden perusteella edellyttää kuormitus-paine -yhteyden vaikuttavien tekijöiden ja niiden vaikutusten tuntemista. Seuraavassa määritellään muutamia paljon käytettäviä termejä:

Akselipaine: Akseliylityksen aikana P4-anturin mittaaman maksimipaineen ja kuormittamattomassa rakenteessa vallitsevan ns. lepopaineen erotus [kPa].

Lämpötila: Päällysteen alapinnasta n. 1,3 m etäisyydeltä päällysteen reunasta mitattu ylitushetken tuntilämpötila [°C]. Kuvaa yläpuolisen rakenteen jäykkyyttä.

Ajolinja: Ajoneuvon etäisyys päällysteen reunasta ensimmäisen laseranturin kohdalla [m]. Kuvaa kuormituksen sijaintia anturiin nähden.

Maksimilinja: Ajolinjan arvo, jolla mitataan ko. rengastuksella suurimmat paineet.

Akselimassa: Akselipaineen aiheuttaneen akselin staattinen massa [kg].

Fraktiili: Muuttujan arvo, jonka alittaa haluttu prosentuaalinen määrä tuloksista.

Päämääränä oli siis määrittää akselimassa ajolinjan, lämpötilan ja paineen funktiona. Käytettävissä oli kuitenkin liian vähän tunnetuilla massan arvoilla mitattuja pai-

netuloksia, jotta eri tekijöiden vaikutukset voitaisiin näiden perusteella selvittää. Tämän vuoksi otettiin käyttöön laaja painemittausaineisto, johon liitettiin ajotapa- ja olosuhdetiedot. Massan vaikutus pyrittiin selvittämään tilastollisesti erilaisten massan ja paineen yhteyteen liittyvien oletusten perusteella. Akselimassojen määrittämisessä lähdettiin tarkastelemaan paineen muutoksia kolmen tekijän suhteen eli valittiin selitettäväksi tekijäksi akselipaine ja selittäviksi tekijöiksi ajolinja, päällysteen lämpötila ja akselimassa (Kuva 27). Vaikka akselipaineisiin vaikuttavat tekijät ovat toisistaan riippumattomia, niillä on selkeät yhteisvaikutukset paineisiin, joten eri tekijöiden vaikutuksia ei voitu käsitellä erikseen.

Jotta eri tekijöiden vaikutukset ja niiden yhteisvaikutukset saataisiin esiin, täytyi aineisto luokitella siten, että luokkien sisällä tekijät pysyvät lähes vakioina. Kun selitettävänä tekijänä käytettiin mitattua akselipainetta, voitiin ajolinjan ja lämpötilan vaikutukset selvittää jakamalla paineaineisto luokkiin, joissa lämpötila ja ajolinja vakioidaan. Tällöin luokkien sisällä paineen muutokset voitiin selittää pelkästään akselimassan muutoksilla.

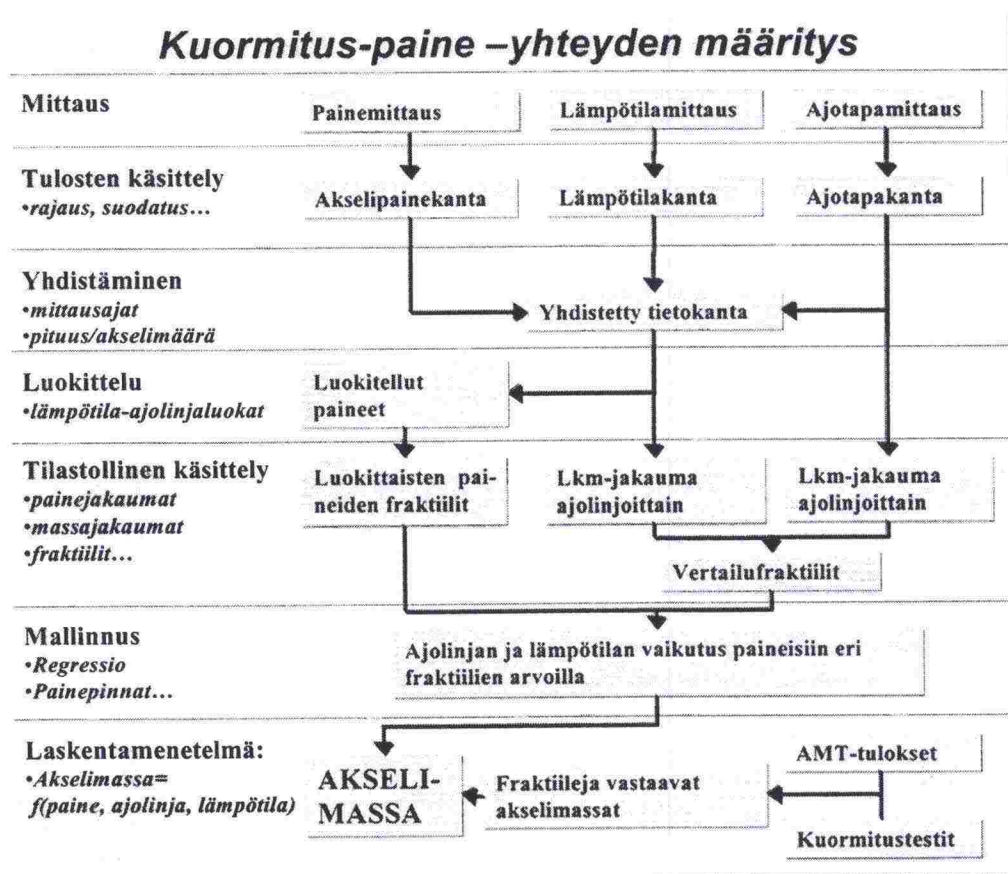
Kun ajolinjan ja lämpötilan vaikutus oli vakioitu, lähdettiin luokittaisista paineista hakemaan saman akselimassa aiheuttamia paineita käyttämällä tiettyjä oletuksia, jotka liittyvät massan ja paineen suhteeseen. Päällysteen lämpötila, ajoneuvon ajolinja ja akselimassa ovat toisistaan riippumattomia eli lämpötila ei vaikuta koetien ylittäneiden ajoneuvojen akselimassoihin eikä kuljettajan valitsema ajolinja riipu kuormasta tai päällysteen lämpötilasta. Tämän vuoksi voitiin olettaa, että esimerkiksi luokittaisten paineiden mediaani on aiheutunut samasta akselimassasta. Tässä yhteydessä oli kuitenkin otettava huomioon muutamia tierakenteen toimintaan, mittaustekniikkaan ja mittaustulosten käsittelyyn liittyviä asioita:

- Tulosten käsittelyssä ja yhdistämisessä karsiutuu aina jonkin verran tuloksia.
- Tarkasteltavan ajolinjan ja maksimilinjän etäisyyden kasvaessa painetulosten määrä vähenee suhteessa maksimilinjalta mitattuun määrään, koska tallennuksen "käynnistymiskynnys" jää keveimmillä ajoneuvoilla saavuttamatta.
- Tulosten karsiutuminen ajolinjan ja maksimilinjän välisen etäisyyden kasvaessa alkaa keveimmistä ajoneuvoista.
- Myös päällysteen lämpötilalla on vaikutusta tulosten karsiutumiseen.

Painetuloksiin, joista ajolinjan ja lämpötilan vaikutus on vakioitu luokittelemalla, pätevät seuraavat oletukset:

- Kuormitus- ja painejakauma vastaavat toisiaan eli, kun muut kuormitus-paine -yhteyteen vaikuttavat tekijät pysyvät vakioina, kuormituksen muutos aiheuttaa saman suuntaisen paineen muutoksen.
- Paineiden muutos voi olla epäsymmetrinen maksimilinjan vertikaaliakselin suhteen vasemman pyöräkuorman vaikutuksen ja anturin mahdollisen kallistuman vuoksi.

Akselimassojen määrittäminen koetiekohteen tulosten perusteella voidaan jakaa seitsemään eri vaiheeseen; mittaus, tulosten käsittely, yhdistäminen, luokittelu, tilastollinen käsittely, mallinnus ja lopullinen laskenta (Kuva 28). Mittaus käsittää tämän työn toisessa kappaleessa esitellyt vaiheet tulosten arkistointiin asti. Tulosten käsittely sisältää kappaleessa 3 esitetyt arkistoitujen tulosten pohjalta tehdyt suodatuksot ja laskennat sekä käsiteltyjen tulosten siirtämisen tietokantoihin. Tulosten yhdistämisessä paine-, ajotapa- ja lämpötilakannat yhdistetään yhdeksi tietokannaksi, josta tulokset ovat joustavasti haettavissa.



Kuva 28. Kuormitus-paine -yhteyden määrittäksen periaatekaavio.

Luokitteluvaiheessa painetuloista suodatettiin ensin etuakselien tulokset, jotka jaettiin lämpötila- ja ajolinjaluokkiin. Luokittaisista paineista määritettiin tämän jälkeen tilastollisella käsittelyllä viittä vakioakselimassaa vastaavat paineet, joiden pe-

rusteella mallinnettiin lämpötilan ja ajolinjan vaikutus akselipaineisiin viidellä eri akselimassan arvolla. Tilastollisen käsittelyn yhteydessä otettiin huomioon mittaus-tekniikasta johtuva tulosten karsiutuminen käyttämällä ns. vertailufraktiileja.

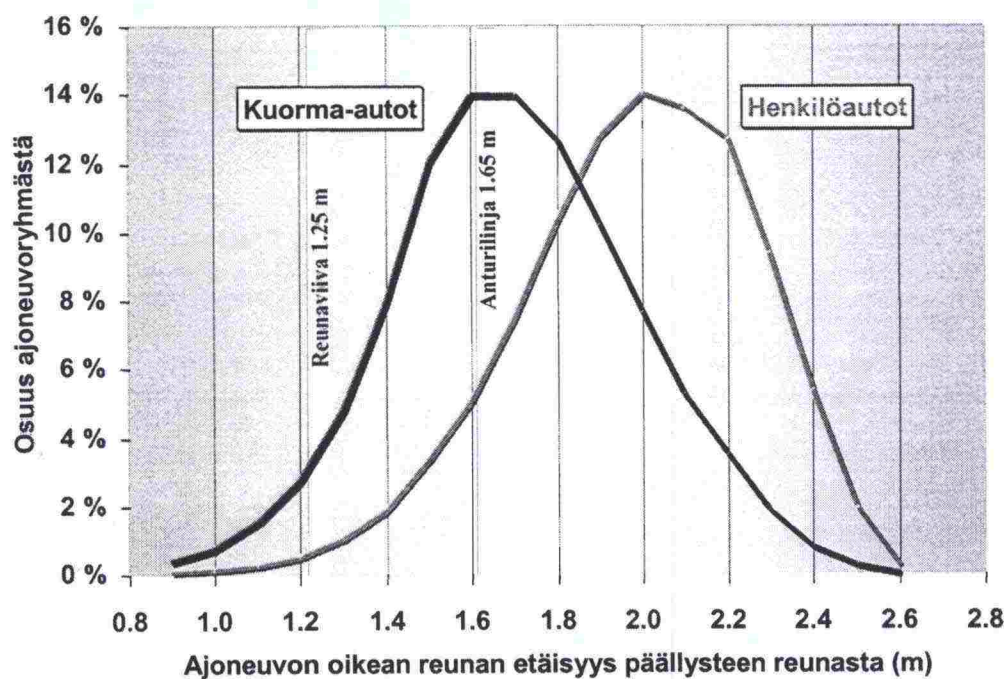
Laskentavaiheessa määritettiin viimeisen akselimassatutkimuksen tulosten pohjalta em. vakiokuormituksia vastaavat akselimassan arvot, jonka jälkeen voitiin määrittää menetelmä, jolla akselimassa saadaan mitattavien tekijöiden eli ajolinjan, lämpötilan ja paineen funktioksi. Koetiekohteessa tehtyjen kuormitustestien tuloksia käytettiin menetelmän toimivuuden testaamiseen.

Määritysmenetelmän vaiheista mittaus sekä tulosten käsittely ja yhdistäminen on esitetty tämän työn kappaleessa 2 ja 3. Seuraava vaihe akselimassojen määrittämisessä on painetulosten luokittelu. Jatkossa esitellään menetelmän vaiheet käyttämällä esimerkkinä yksikköpyörillä varustettujen yksittäisakselien akselimassa-paine – yhteyden määrittystä. Muiden rengastus- ja akselityyppien akselimassojen määrittäminen on periaatteessa täysin samanlainen. Vain viimeisessä vaiheessa tehtävässä painefraktiileja vastaavien akselimassojen määrittämisessä yksittäisakseleille käytettiin menetelmää, jota ei ole käytettävissä muille tyypeille, koska akselimassatutkimustulosten pohjalta ei ole löydettävissä muille akselille samanlaista yhteyttä.

5.3 Aineiston luokittelu

Jotta päästäisiin tarkastelemaan akselimassan ja sen aiheuttaman P4-akselipaineen riippuvuutta, täytyi muiden tekijöiden vaikutukset vakioda. Koska käytettävissä oli suuri määrä tuloksia, voitiin käyttää aineiston luokittelua. Luokittelulla pyrittiin jakamaan aineisto osiin, joissa tarkasteltavaan tekijään vaikuttaa ainoastaan haluttu muuttuja ja muut tekijät pysyvät lähes vakiona. Luokittelun käyttö edellyttää, että jokaiseen käsiteltävään luokkaan saadaan tarpeellinen määrä tuloksia, jotta niiden perusteella voidaan selvittää tarkasteltavan tekijän vaikutukset. Koska luokiteltavia tuloksia käytetään tilastollisten tarkastelujen pohjana, tulosten luotettavuus riippuu selkeästi otoksen suuruudesta.

Tuloksia oli luonnollisesti eniten ns. normaaliajolinjaa lähinnä olevissa ajolinjalukissa (Kuva 29). Ajotapamittaustulosten alustavissa tarkasteluissa havaittiin kuorma-autojen oikean pyörän ajouran osuvan suurimmaksi osaksi lähelle anturilinjaa, mikä on ollut tarkoituskin anturien sijaintia suunniteltaessa. Sekä kuorma- että henkilöautojen vasen pyöräura noudattaa yleensä samaa ajolinjaa. Koska henkilöautot ovat kapeampia, niiden ajolinja eli oikean reunan etäisyys päällysteen reunasta painottuu hieman keskemälle ajorataa. Kuorma-autojen lukumäärä pienenee nopeasti siirryttäessä normaaliajolinjalta sivulle. Samalla P4-anturin käynnistymiskynnyksen ylittämiseen vaaditaan suurempia akselimassoja, joten ajolinjaluokittaiset painetulokset vähenevät vielä nopeammin.



Kuva 29. Kuorma- ja henkilöautojen ajolinjajakaumat koetiealueen ajotapatulosten alustavien tarkastelujen perusteella.

Kesän 2000 aineisto jaettiin ensin kolmen asteen lämpötilaluokkiin ja jokaisen lämpötilaluokan paineet anturiliinan läheisyydessä viiden cm:n ja kaukana anturiliinasta 10 cm:n ajolinjaluokkiin. Näin aineisto luokiteltiin 11 lämpötilaluokkaan ja 19 ajolinjaluokkaan (Taulukko 8). Yhteensä etuakseleista tuli mukaan 21486 akselipainetta eli vain hieman yli 500 ajoneuvon tulokset jäivät luokkien ulkopuolelle. Koska luokittaisten tulosten perusteella määritettiin jakaumiin perustuvia tunnuslukuja, otettiin lopulliseen tarkasteluun mukaan vain luokat, joissa on tuloksia enemmän kuin puolet keskimääräisestä luokittaisesta lukumäärästä eli enemmän kuin 51 painetusta. Karsittujen luokkien tulokset pidettiin kuitenkin mukana, koska niitä voitiin käyttää tarkasteltaessa tuloksia silmämääräisesti kuvaajien perusteella, kun arvioitiin tulosten pohjalta tehtyjen mallien toimivuutta.

Taulukko 8. Etuakselipainetulosten lukumäärät luokittain.

Ajolinja- luokka [m]	Lämpötilaluokan keskipiste [°C]											Yht.
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	
1.05	2	29	20	37	22	31	29	32	26	11	2	241
1.15	10	72	48	69	69	62	70	37	29	23	8	497
1.25	18	138	76	140	117	143	112	60	74	37	9	924
1.35	39	235	168	247	185	230	178	136	116	57	15	1606
1.425	30	171	124	183	147	143	116	90	84	50	12	1150
1.475	32	209	134	216	165	207	167	110	91	52	17	1400
1.525	47	241	168	235	202	211	177	134	137	58	15	1625
1.575	32	212	181	280	217	204	182	155	139	54	23	1679
1.625	36	223	190	252	209	219	178	159	135	57	23	1681
1.675	52	217	188	232	196	239	203	151	144	64	12	1698
1.725	38	219	160	214	201	235	183	136	126	44	23	1579
1.775	44	211	140	203	176	174	169	124	127	48	21	1437
1.825	31	162	125	188	143	169	145	111	92	37	12	1215
1.875	30	177	103	156	113	145	119	102	86	35	10	1076
1.95	35	234	154	235	188	203	183	159	143	63	23	1620
2.05	27	150	122	118	120	126	111	91	104	42	11	1022
2.15	18	83	69	64	65	80	86	57	60	25	8	615
2.25	14	49	31	42	33	39	34	27	17	13	0	299
2.35	12	13	8	21	19	12	8	12	10	7	0	112
Yht.	547	3045	1109	3132	2587	2872	2450	1883	1740	777	244	21486

5.4 Tilastollinen käsittely

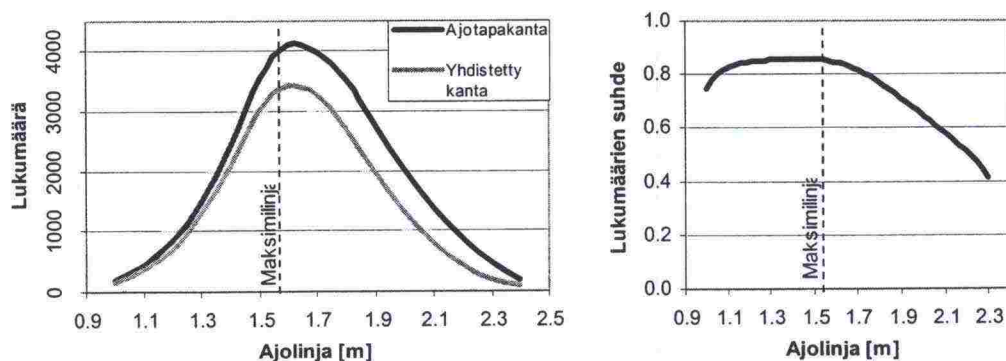
Tilastollisella käsittelyllä etsittiin luokittaisista tuloksista saman akselimassan aiheuttamat paineen arvot. Kun oletetaan, että luokan sisällä paineiden suuruus riippuu pelkästään akselimassasta, voidaan olettaa saman suuruisen paineen aiheutuneen aina saman suuruisesta massasta. Tämän seurauksena luokittaisen painejakauman muoto vastaa sen massajakauman muotoa, josta paineet ovat aiheutuneet. Painejakaumista määritettyjä fraktiileja vastaavat paineet ovat aiheutuneet siis massajakaumien samoja fraktiileja vastaavista massoista. Koska fraktiilien perusteena on otoksen lukumäärien perusteella laskettavat arvot, ne eivät ole yhtä herkkiä yksittäisille virheille kuin esimerkiksi keskiarvo.

Jos P4-anturilla saataisiin mitattua jokaisesta ajolinjaluokasta kaikki raskaat ajoneuvot eli eri luokkien kuormitusjakaumat vastaisivat toisiaan, voitaisiin käyttää samaa jakaumien perusteella määritettävää tunnuslukua kaikissa luokissa. Painemittauksessa käytetään menetelmää, jossa tallennus alkaa, kun anturin antama kuormitusajajännitekäyrän kaarevuus ylittää tietyn raja-arvon. Raja-arvo ylittyy eri suuruisilla kuormituksilla eri ajolinjaluokissa eli suurella maksimilinjan ja ajolinjan etäisyydellä mittauksen käynnistymiseksi vaaditaan suurempaa kuormitusta kuin kuormittavan pyörän kulkiessa läheltä maksimilinjaa. Tämän seurauksena painemittauksilla saadut tulokset eivät ole aiheutuneet samanlaisesta kuormitusjakaumasta kaikissa luokissa.

Koska tulosten karsiutuminen alkaa kuormitusjakauman alapäästä, luokittaisista painejakaumista voidaan määrittää saman kuormituksen aiheuttama paine käyttämällä ns. vertailufraktiileja. Vertailufraktiililla tarkoitetaan tässä työssä painejakaumasta jokaiselle luokalle määritettävää arvoa, joka vastaa anturin päältä mitattujen ajolinjaluokan painejakauman perusteella määritettyä halutun fraktiilin arvoa.

Vertailufraktiilien käytöllä pyrittiin siis ottamaan huomioon mittaustekniikasta johtuvan tulosten karsiutumisen vaikutus.

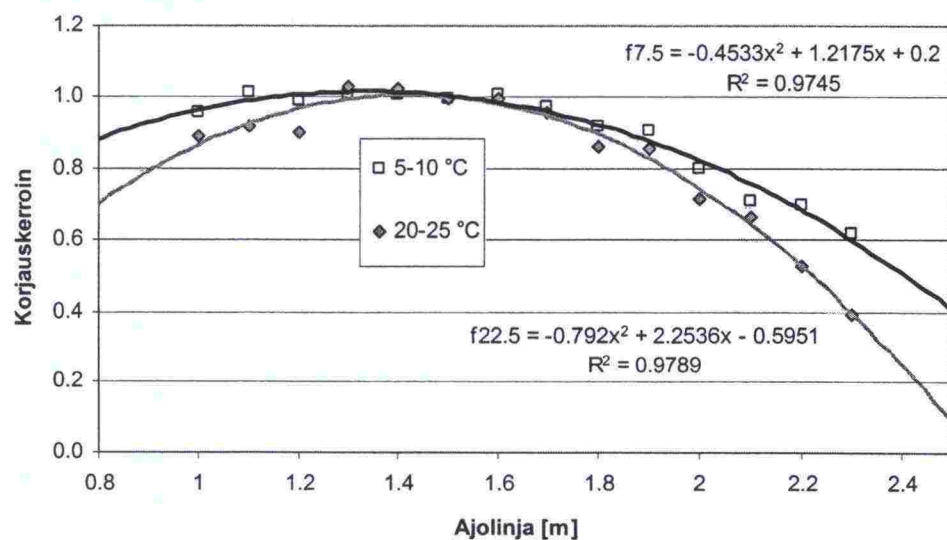
Vertailufraktiilien määrittäminen tehtiin vertaamalla yhdistetyn tulokannan ajolinjaluokittaisia ajoneuvolukumääriä ajotapamittauksessa saatuihin raskaan liikenteen ajolinjaluokittaisiin lukumääriin. Määrittäminen aloitettiin laskemalla ajoneuvomäärät 10 cm:n ajolinjaluokittain sekä ajotapakannasta että yhdistetystä tulokannasta (Kuva 30). Luokittaisten lukumäärien suhteesta voitiin päätellä, kuinka paljon tuloksia karsiutuu ajolinjan muuttuessa. Maksimilinjalta mitattujen lukumäärien suhde oletettiin vastaavan suhdetta, joka maksimissaan voidaan saavuttaa kantojen yhdistämisestä johtuvien karsiutumisten vuoksi. Näin saatiin ajolinjan funktiona käyrä, josta voidaan määrittää ajoneuvojen suhteellinen osuus, joka karsiutuu paineiden pienenemisen vuoksi kuormituksen siirtyessä kauemmas anturilinjalta.



Kuva 30. Ajotapakannasta ja yhdistetystä kannasta määritetyt raskaan liikenteen ajoneuvoyhdistelmämäärät sekä lukumäärien suhde ajolinjaluokittain.

Päällysteen lämpötilalla on myös vaikutusta tulosten karsiutumiseen. Samalla kuormituksella päällysteen jäykkyyden muutos muuttaa paineiden jakautumista sitomattomissa kerroksissa. Lämpötilan noustessa päällysteen kyky jakaa kuormitusta heikkenee, joten paine jakautuu pienemmälle alalle ja samalla paine suoraa kuormituksen alla kasvaa. Mitä korkeampi on päällysteen lämpötila sitä enemmän tuloksia karsiutuu ajolinjan ja maksimilinjain välisen etäisyyden kasvaessa, koska kevyimpien ajoneuvojen aiheuttamat paineet eivät ylitä tallennuskynnystä.

Lämpötilan vaikutus tulosten karsiutumiseen määritettiin tarkastelemalla ajolinjoitain luokiteltujen tulosten karsiutumista erikseen lämpötila-alueilla 5-10 °C ja 20-25 °C (Kuva 31). Tulosten perusteella määritettiin luokkakeskipisteitä vastaavat käyrät, jotka kuvaavat tulosten karsiutumista lämpötila-arvoilla 7,5 °C ja 22,5 °C ajolinjan funktiona.



Kuva 31. Lämpötilan ja ajolinjan vaikutus tulosten karsiutumiseen

Käyrien perusteella tehtiin lineaarinen lämpötilakorjaus ja määritettiin jokaiselle luokalle kerroin, joka ilmoittaa, kuinka suuri osa tuloksista luokassa tulee mukaan verrattaessa anturin päältä mitattuun ajolinjaluokkaan (Taulukko 9). Maksimilinja sijaitsee etuakseleilla noin 1,55 metrin etäisyydellä päällysteen reunasta, joten sille annettiin kerroin yksi ja muiden ajolinjaluokkien kertoimet ilmoittavat kuinka suuresta osasta ajotapakannasta ko. ajolinjaa ajaneista ajoneuvoista on löydetty tiedot yhdistetystä tietokannasta. Koska lämpötilalla ei ole vaikutusta maksimilinjalta mitattuihin ajoneuvomääriin, annettiin kerroin yksi kaikille maksimilinjän lämpötilaluokille.

Taulukko 9. Luokittaisten tulosten lukumäärien suhde maksimilinjalta mitattuihin lukumääriin.

Ajolinja- luokka [m]	Lämpötilaluokan keskipiste [°C]										
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
1.05	1.01	0.99	0.98	0.96	0.95	0.93	0.91	0.90	0.88	0.87	0.85
1.15	1.02	1.01	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92
1.25	1.03	1.02	1.01	1.01	1.00	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97
1.35	1.02	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
1.425	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00
1.475	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00
1.525	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.575	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
1.625	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97
1.675	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95
1.725	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93
1.775	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.90	0.90
1.825	0.93	0.92	0.91	0.91	0.90	0.89	0.89	0.88	0.87	0.87	0.86
1.875	0.91	0.90	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.85	0.84	0.83	0.82
1.95	0.88	0.86	0.85	0.84	0.83	0.81	0.80	0.79	0.78	0.76	0.75
2.05	0.83	0.81	0.79	0.77	0.75	0.73	0.72	0.70	0.68	0.66	0.64
2.15	0.78	0.75	0.72	0.70	0.67	0.64	0.62	0.59	0.56	0.54	0.51
2.25	0.72	0.68	0.64	0.61	0.57	0.54	0.50	0.47	0.43	0.39	0.36
2.35	0.65	0.60	0.56	0.51	0.47	0.42	0.37	0.33	0.28	0.23	0.19

Kun oletetaan, että tulosten karsiutuminen alkaa kevyimmistä ajoneuvoista, voitiin jokaiselle luokalle määrittää vertailufraktiilit, jotka vastaavat maksimilinjalta mitattujen painejakaumien fraktiileja. Tarkasteltaviksi maksimilinjalla fraktiilien arvoiksi valittiin F95, F90, F75, F50, ja F25, joilla kuvataan viiden eri akselimassan aiheuttaneita paineita. Olettamalla, että tulosten karsiutuminen tapahtuu jakauman alasta, voitiin vertailufraktiilit laskea kaavalla:

$$A_{ij} = 100 - (100 - A) / kk_{ij} \quad (1)$$

A_{ij} = Vertailufraktiilin arvo luokassa ij

i = Lämpötilaluokka

j = Ajolinjaluokka

A = Fraktiilin arvo maksimijajolinjalla

kk_{ij} = Korjauskerroin luokassa ij (Taulukko 8)

Taulukossa 10 on esimerkiksi maksimilinjalla fraktiilia F75 vastaavat luokittaiset vertailufraktiilit. Ajoneuvojen painetulojen lukumäärä suhteessa maksimilinjalla mitattuun lukumäärään pienenee ajolinjan siirtyessä anturilinjalla vasemmalle ja lämpötilan kasvaessa, joten samaa massaa vastaava paineen arvo saadaan pienemmällä fraktiilin arvolla.

Taulukko 10. F75:a vastaavat luokittaiset vertailufraktiilit.

Ajolinja- luokka [m]	Lämpötilaluokan keskipiste [°C]										
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
1.05	75	75	74	74	74	73	73	72	72	71	71
1.15	76	75	75	75	74	74	74	74	73	73	73
1.25	76	75	75	75	75	75	75	75	74	74	74
1.35	76	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
1.425	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
1.475	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
1.525	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
1.575	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
1.625	75	75	75	74	74	74	74	74	74	74	74
1.675	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74
1.725	74	74	74	74	74	73	73	73	73	73	73
1.775	73	73	73	73	73	73	73	73	72	72	72
1.825	73	73	73	72	72	72	72	72	71	71	71
1.875	72	72	72	72	71	71	71	70	70	70	70
1.95	71	71	71	70	70	69	69	68	68	67	67
2.05	70	69	68	68	67	66	65	64	63	62	61
2.15	68	67	65	64	63	61	59	58	56	53	51
2.25	65	63	61	59	56	53	50	46	42	37	30
2.35	62	59	55	51	46	40	33	24	11	-6	-33

Vastaavalla tavalla määritettiin jokaista valittua maksimilinjan fraktiliin arvoa vastaavat luokittaiset vertailufraktiilit. Tämän jälkeen luokittaisista painetuloksista määritettiin vertailufraktiliien avulla fraktilleja F25, F50, F75, F90 ja F95 vastaavat paineet (Taulukko 11).

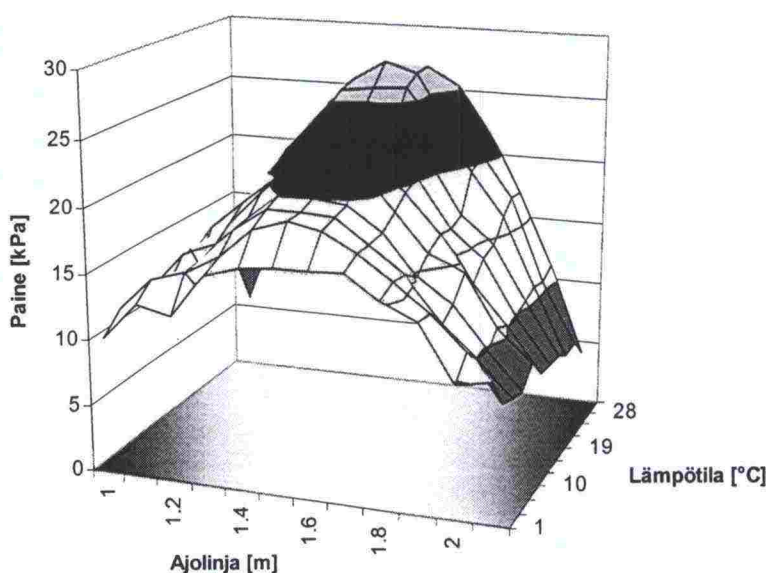
Taulukko 11. Esimerkkinä F75:a vastaavat luokittaiset paineen arvot [kPa]. Luokkien, joissa tulosten lukumäärä on pienempi kuin 51 arvot on kursivoitu.

Ajolinja- luokka [m]	Lämpötilaluokan keskipiste [°C]										
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
1.05	10.7	13.7	13.4	15.8	13.0	15.2	14.4	13.3	14.7	15.8	6.0
1.15	14.3	17.1	15.3	17.1	17.3	19.8	17.1	18.3	19.9	17.7	16.5
1.25	15.4	17.9	18.9	18.7	20.4	20.7	20.9	20.0	22.8	22.2	24.6
1.35	19.6	19.6	20.4	21.9	22.1	23.8	24.3	25.5	25.8	26.9	23.5
1.425	17.7	21.3	22.5	22.7	23.9	25.1	26.2	27.8	28.2	28.3	33.0
1.475	20.0	22.4	23.5	23.9	24.5	25.0	26.8	29.2	30.3	29.8	27.9
1.525	19.9	22.4	23.2	24.4	24.9	25.3	27.7	28.0	29.7	30.7	29.6
1.575	19.0	22.8	23.7	23.4	25.3	26.3	27.3	28.8	29.9	29.6	27.8
1.625	20.6	21.8	23.4	23.5	24.3	26.6	26.7	28.8	29.7	30.7	32.9
1.675	19.7	21.9	23.1	23.2	24.8	26.2	25.8	26.7	29.8	29.8	28.0
1.725	18.5	21.5	22.0	23.2	24.3	24.5	25.3	26.1	28.8	29.6	31.3
1.775	20.2	20.6	21.2	21.9	22.8	22.6	23.8	25.1	26.9	27.1	30.0
1.825	17.7	19.8	20.0	19.8	20.3	22.7	22.4	23.3	24.5	26.2	25.8
1.875	17.2	18.7	18.2	18.1	18.9	20.5	20.3	21.3	23.5	23.7	25.6
1.95	17.0	16.9	15.5	15.7	17.8	17.1	17.5	18.5	20.5	24.0	21.9
2.05	14.7	15.2	12.4	13.1	14.4	13.4	14.6	14.7	16.1	17.3	20.1
2.15	14.2	10.6	10.3	9.6	12.9	9.4	9.5	9.9	10.2	13.2	8.7
2.25	16.3	10.5	8.6	7.6	8.5	6.9	7.3	6.8	7.8	9.3	
2.35	15.04	12.93	5.47	5.49	6.77	4.88	4.67	5.30	3.34		

5.5 Ajolinjan ja lämpötilan vaikutusten mallinnus

Kun oletetaan, että yhtä fraktiliin arvoa vastaavat paineet ovat aiheutuneet samasta akselimassasta eri luokissa, voidaan määrittää ajolinjan ja lämpötilan vaikutukset kuormitusten aiheuttamiin paineisiin. Menetelmää voidaan havainnollistaa asetta-

malla tulokset kolmiulotteiseen koordinaatistoon, jossa vaaka-akseleina ovat ajolinja ja lämpötila ja pystyakselina paine. Tällä tavoin saadaan pinta, joka kuvaa paineiden muuttumista lämpötilan ja ajolinjan funktiona vakiokuormituksella (Kuva 32). Mallinnusvaiheessa pyrittiin löytämään matemaattiset yhtälöt kuvaamaan ajolinjan ja lämpötilan muutosten vaikutusta paineisiin eri fraktiileja vastaavilla arvoilla. Toisin sanoen kuvan 32 kaltaisille pinnoille etsittiin matemaattiset yhtälöt ja samalla tasoitettiin yksittäisten pisteiden "virheitä", koska paineen muutosten voidaan olettaa muuttuvan tasaisesti siirryttäessä luokasta toiseen.



Kuva 32. Mediaanikuormitusta vastaavien P4-paineiden muutokset ajolinjan ja lämpötilan funktiona.

Jokaista fraktiilin arvoa vastaavat pinnan yhtälöt määritettiin käyttämällä lineaarista regressiota. Regressioanalyysissä selittävinä tekijöinä olivat lämpötila ja ajolinja ja selitettävänä tekijänä paine. Analyysin perusteella haettiin yhtälöt, jotka korreloivat mahdollisimman hyvin laskettujen lähtöarvojen kanssa. Lisäksi yhtälöiden tuli täyttää tietyt reunaehdot. Regressiossa ajolinjan vaikutusta kuvattiin kolmannen asteen käyrällä, mikä mahdollistaa käyrän epäsymmetrisen muuttumisen maksimilinjaa eri puolilla. Logaritmia käytettiin pakottamaan paineen arvot positiivisiksi kaikilla arvoilla, jolloin tulosten käsittelyyn ei tarvitse tehdä erillisiä rajoituksia ajolinjan suhteen. Lämpötilan vaikutus otettiin mukaan lineaarisena sekä tulona jokaisen ajolinjatekijän kanssa, jolloin niiden yhteisvaikutus voitiin ottaa huomioon. Tuloksena saatiin jokaiselle fraktiilin arvolle pinnan yhtälö 2, jonka perusteella voidaan määrittää ko. kuormituksen aikaansaama paine halutuilla lämpötilan ja ajolinjan arvoilla.

$$\ln(\text{Paine}) = A \times \text{Al}^3 + B \times \text{Al}^2 + C \times \text{Al} + D \times \text{Al}^3 \times t + E \times \text{Al}^2 \times t + F \times \text{Al} \times t + G \times t + H \quad (2)$$

A, B, ..., H ovat taulukon 12 kertoimia

Al = Ajolinja (m)

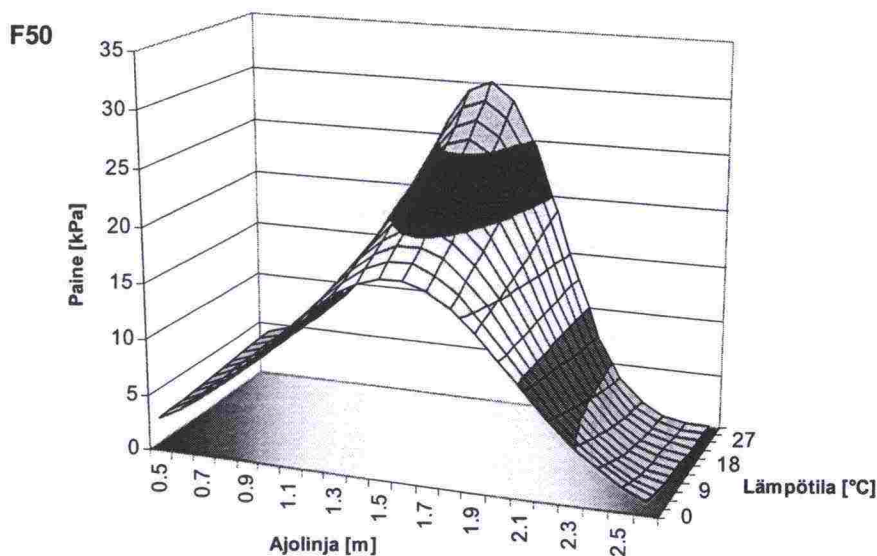
t = Päällysteen lämpötila (°C)

Vastaavat regressiot tehtiin kaikille eri massoja vastaaville fraktiilien arvoille, joten tuloksena saatiin viisi pinnan yhtälöä (Taulukko 12).

Taulukko 12. Valittuja fraktiileja vastaavat kaavan 2 kertoimet ja regression korrelaatiokertoimet.

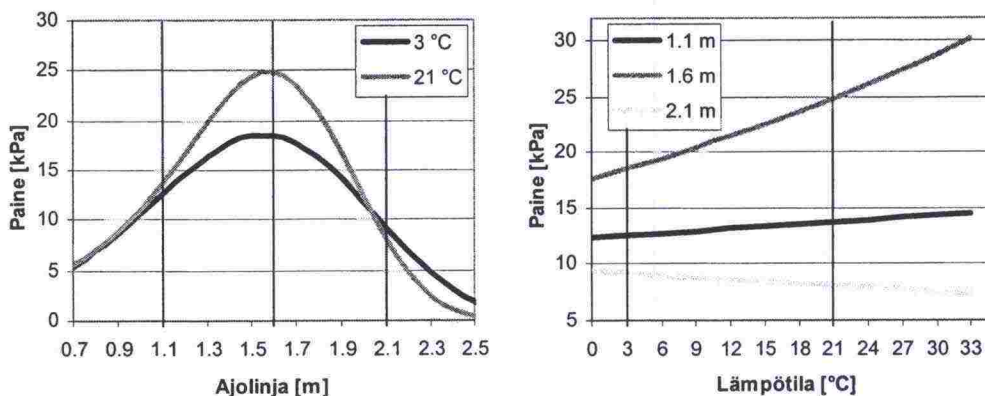
Fraktiili	R2	A	B	C	D	E	F	G	H
F25	0.98	-1.420	4.317	-2.977	-0.181	0.720	-0.925	0.391	2.265
F50	0.99	-0.311	-0.476	3.718	-0.062	0.229	-0.251	0.087	-0.583
F75	0.97	-0.135	-1.222	4.747	-0.030	0.104	-0.096	0.026	-0.863
F90	0.95	0.529	-4.158	9.016	-0.054	0.229	-0.313	0.146	-2.775
F95	0.92	0.566	-4.202	8.926	-0.047	0.217	-0.324	0.169	-2.615

Käyttämällä taulukon 12 kertoimia saatiin jokaista fraktiilia vastaava pinnan yhtälö, joka ilmoittaa fraktiilia vastaavan massan aiheuttaman paineen, kun tiedetään päällysteen lämpötila ja ajoneuvon ajolinja (Kuva 33). Yhtälöt toimivat ajolinja-alueella 0,7-2,5 m, mutta tulosten luotettavuus heikkenee, kun ajolinjan poikkeama raskaan liikenteen keskimääräisestä ajolinjasta kasvaa, mikä johtuu määrittämisen pohjana olleiden luokittaisten tulosten vähenemisestä. Lämpötila-alueena voidaan pitää 0-30 °C.



Kuva 33. Mallinnettu P4-paineen muuttuminen ajolinjan ja lämpötilan funktiona mediaanikuormitusta vastaavalla akselimassalla. Muita fraktiileja vastaavat pinnat liitteessä 2.

Lämpötilan vaikutus paineeseen on suurimmillaan maksimilinjalla (Kuva 34). Ajolinjan poiketessa maksimilinjalta lämpötilamuutoksen vaikutus pienenee ja tietyllä ajolinjan arvolla lämpötilan vaikutus muuttuu vastakkaissuuntaiseksi eli lämpötilan kasvu alkaa pienentää vakiokuormituksen aiheuttamaa painetta. Tämä johtuu siitä, että päällysteen jäykkyyden kasvaessa paineet jakautuvat laajemmalle alueelle, jolloin kaukana anturilinjasta kulkenut pyörä aiheuttaa suuremman paineen anturilinjalla matalalla kuin korkealla lämpötilalla. Malli toimii siis kappaleessa 4.1 esitetyn paineiden jakautumiseen liittyvän teorian mukaan.



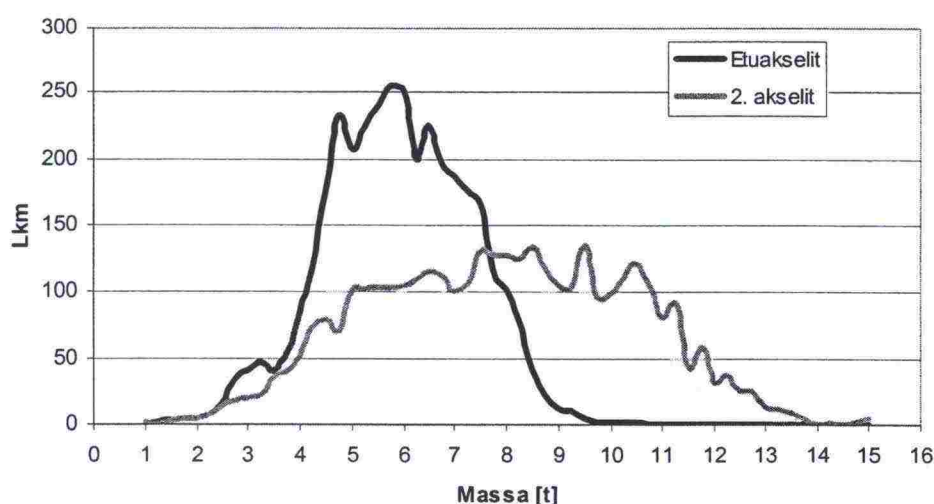
Kuva 34. Ajolinjan ja lämpötilan vaikutus mediaanikuormituksen aiheuttamaan paineeseen.

Ajolinjan vaikutuksen epäsymmetrisyys maksimilinjalla suhteen johtuu pääasiassa anturin kallistumasta ajosuuntaan katsottaessa oikealle eli länteen päin. Jos anturi olisi suorassa, pyörien välistä mitatun paineen tulisi olla molempien pyörien aiheuttamien paineiden summa. Tämän vuoksi raidevälin puolella välissä eli noin metrin päässä anturista pitäisi ajolinjalla 0,6 metriä paineen olla noin kaksinkertainen verrattuna ajolinjalla 2,6 metriä mitattuun paineeseen. Tulosten perusteella esimerkiksi 21 °C:n lämpötilalla paine menee nolleen jo ajolinjalla 2,5 metriä, mutta ajolinjalla 0,6 metriä paine on vielä noin 5 kPa (Kuva 34). Anturin kallistumisteoriaa tukee myös P4-tulosten nopeampi väheneminen ajolinjaluokissa, joissa oikea pyörä on kulkenut anturilinjalla vasemmalta puolelta verrattaessa oikean puolen ajolinjaluokkiin (Kuva 30). Toisaalta samanlainen vaikutus voi olla myös rakenteen holvautumisella eli anturilinjalla oikealla puolella rakenne siirtää tehokkaammin kuormia anturin tasolle kuin vasemmalla puolella.

5.6 Massojen laskentamenetelmä

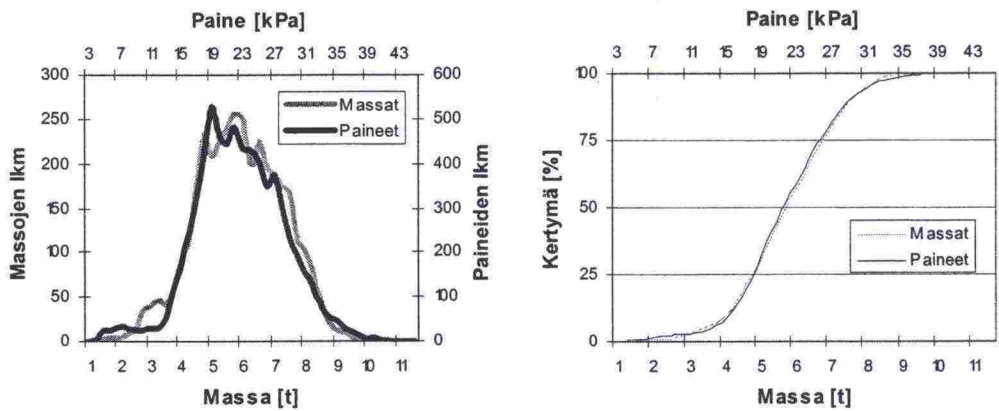
Tulosten mallinnuksella saatiin määritettyä ajolinjan ja lämpötilan vaikutukset P4-akselipaineisiin viidellä eri suuruuisella akselimassan arvolla. Jotta mallien perusteella voitaisiin määrittää akselimassoja, täytyy mallinnuksessa käytettyjä fraktileja vastaavien akselimassatunten tuntea. Tähän tarkoitukseen käytettävissä oli koetiekohteessa tehtyjen kuormitustestien tulokset sekä viimeisimmän akselimassatutkimuksen ai-neisto.

Valittuja fraktiilin arvoja vastaavat etuakselien massat määritettiin viimeisimmän akselimassatutkimusaineiston perusteella. Koska kuorma-autoissa lastin paino pyritään siirtämään maahan teliakselien kautta, etuakselien massat jakautuvat suhteellisen kapealle alueelle verrattaessa ajoneuvoyhdistelmien muihin akseleihin (Kuva 35). Akselimassatutkimusaineiston perusteella havaittiin etuakselimassojen hajonnan olevan suhteellisen vähäistä myös eri mittauspisteiden välillä, joten akselimassatutkimuksen etuakselien massajakauman voidaan olettaa kuvaavan myös Temmeksen etuakselimassoja.



Kuva 35. Etu- ja toisten akselien massojen jakaumat uusimman akselimassatutkimuksen perusteella. Luokkajako 250 kg.

Yhtenä lähtöoletuksena oli, että akselipaine- ja massajakaumien muodot vastaavat toisiaan. Tätä tarkasteltiin asettamalla anturin päältä mitattujen kuormitusten aiheuttamien paineiden jakauma ja AMT:n etuakselien massajakauma samaan kaavioon (Kuva 36). Jakaumat ovat hyvin samankaltaisia, joten akselimassatutkimuksen massajakaumasta määritettäviä arvoja voitiin käyttää Temmeksen akselimassa-arvoina.



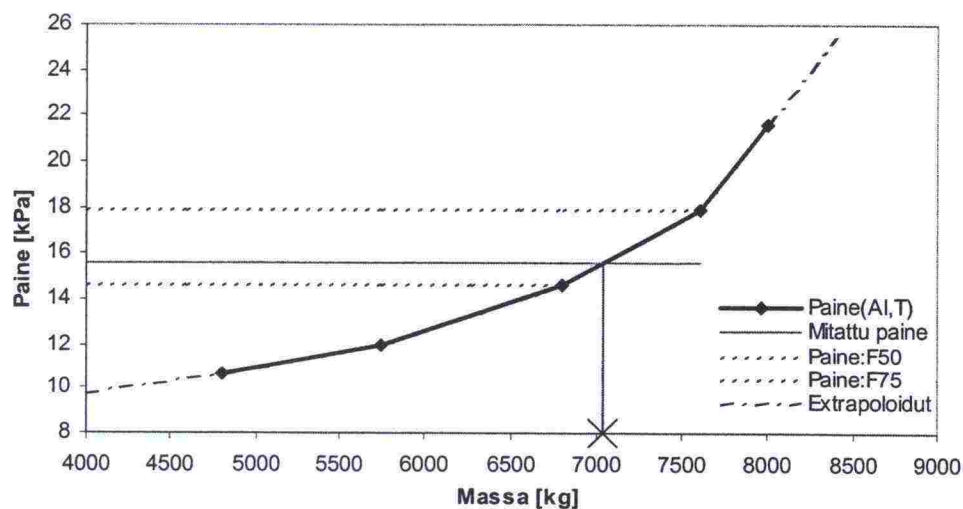
Kuva 36 Viimeisimmän akselimassatutkimuksen etuakselimassojen ja koealueelta mitattujen etuakselipaineiden jakaumat ja kertymäkäyrät.

Akselimassatutkimuksen tuloksista määritettiin fraktiileja F25, F50, F75, F90 ja F95 vastaavat akselimassat (Taulukko 13), joiden aiheuttamia paineita vertailufraktiilien avulla määritetyt luokittaisten paineiden arvot vastaavat. Akselimassatutkimuksen yhteydessä tehdyissä vaa’an kalibroinneissa havaittiin tutkimuksessa käytetyn vaa’an antavan noin kolme prosenttia liian suuria arvoja verrattuna staattisiin vaa’koihin, joten verrattaessa tuloksia esim. koetiekohteessa tehtyjen kuormitustestien tuloksiin, täytyi akselimassatutkimustulosten perusteella määritettyjä arvoja pienentää.

Taulukko 13. Valittuja fraktiilin arvoja vastaavat akselimassatutkimustulosten perusteella määritetyt ja staattiset massat.

Fraktiili	Massa_AMT (kg)	Massa_st (kg)
F25	4750	4608
F50	5750	5575
F75	6750	6548
F90	7500	7275
F95	8000	7760

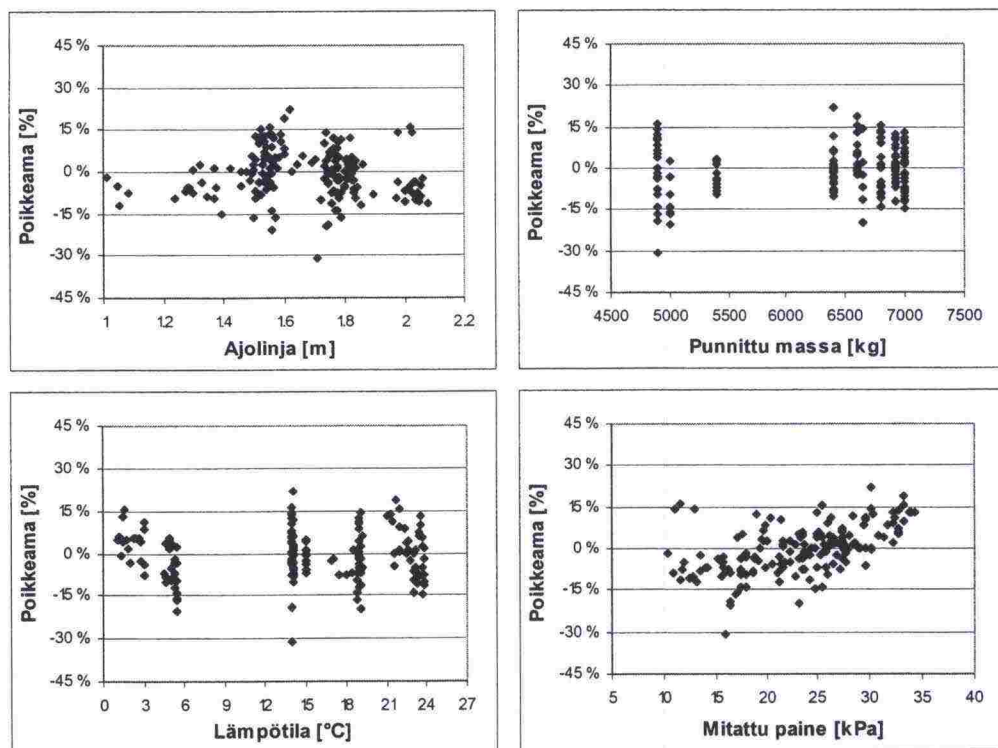
Akselimassojen laskemiseksi laadittiin Excel-pohjainen menetelmä, jolla etuakselien massat lasketaan antamalla lähtöarvoina mitatut ajolinja-, lämpötila- ja akseli-painetulokset. Laskennassa mitattua paineen arvoa verrataan samalla ajolinjalla ja lämpötilalla kaavalla 2 laskettuihin paineen arvoihin ja tehdään lineaarinen korjaus kahden lähimmän lasketun painearvon välillä (Kuva 37). Jos mitattu paineen arvo on pienempi kuin F25:n tai suurempi kuin F95:n arvoilla laskettu, tehdään lineaarinen korjaus kahden pienimmän tai kahden suurimman lasketun paineen arvon perusteella.



Kuva 37. Massan määrittämisen periaate. Esimerkkiarvoina vuonna 1998 mitattu tulos, jossa ajolinja oli 1,0 m ja lämpötila 23,7 °C.

Menetelmän toimivuutta tarkasteltiin 1998 tehtyjen kuormitustestien tulosten perusteella. Kuormitustesteissä koealueen yli ajettiin erilaisilla akselipainoilla, ajolinjoilla ja nopeuksilla [Sikiö, 1999]. Testimittauksista saatiin mukaan 187 tunnetuilla akselimassoilla saatua mittaustulosta, joille määritettiin akselimassat ko. menetelmällä ja laskettiin prosentuaalinen poikkeama punnitusta staattisesta akselimassasta.

Laskennan toimivuutta tarkasteltiin eri lähtöarvojen suhteen prosentuaalisen poikkeaman ja lähtöarvojen välisten hajontakuvioiden avulla (Kuva 38). Lämpötilalla ja punnitulla massalla on erittäin vähän vaikutusta poikkeamiin eli niiden osalta menetelmä toimii oikein. Mitatun paineen kasvaessa poikkeamat näyttävät hieman kasvavan, mikä saattaa osaltaan johtua tierakenteen ylimpien kerrosten kantavuusominaisuuksien muuttumisesta kesien 1998 ja 2000 välillä. Merkittävimmän massa-painesuhteeseen vaikuttavan tekijän eli ajolinjan suhteen menetelmä näyttäisi toimivan suhteellisen hyvin, vaikka maksimilinjalla (n.1,6 m) poikkeamat painottuvat hieman positiivisiksi ja kauempana hieman negatiivisiksi. Tämä saattaa olla myös seurausta rakenteen kantavuusominaisuuksien muuttumisesta.



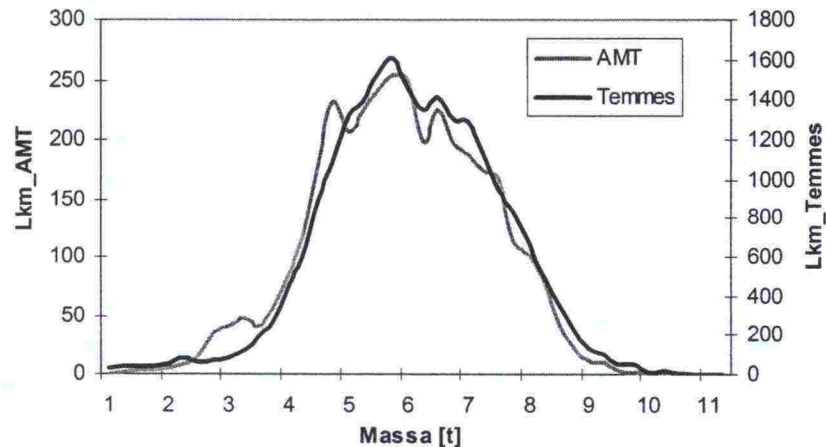
Kuva 38. Vuonna 1998 tehtyjen kuormitustestitulosten perusteella laskettujen ja punnittujen tulosten prosentuaalisten poikkeamien sekä eri tekijöiden väliset hajontakuviot.

Kun luotettavuusvälinä (confidence interval) käytettiin 93,9 %:a poikkeamien maksimiarvoiksi saatiin $-12,9\%$ ja $+14,3\%$. Tämä vastaa eurooppalaisen tutkimusyhdistysoelimen COST-323:n automaattisten akselipainovaakojen luokituksen mukaan luokkaa B(10) eli järjestelmän tarkkuus riittäisi etuakselien osalta yksityiskohtaisen tiedon keräämiseen liikenteestä. [Halonen, P. ym., 1993, Jacob, B., 1998]

Paineiden perusteella määritettyjen ja staattisten etuakselimassojen väliset poikkeamat ovat hyvin pieniä, kun otetaan huomioon, että painetuloksissa on mukana myös dynaamiset kuormitukset. Tätä voidaan selittää sillä, että koetiealueen kuormitustestit on tehty käyttämällä samaa ajoneuvoa. Dynaamisten kuormitusten vaikutukset ovat jokaisella ylityskerralla suunnilleen samanlaiset, koska etuakselin pystysuuntainen liikkeen taajuus pysyy vakiona. Jos testiaineistona käytettäisiin liikenteestä satunnaisesti poimittavia ajoneuvoja, paineiden perusteella tuskin päästäisiin näin vähäisiin poikkeamiin verrattaessa staattisiin akselimassoihin. Kuorma-autojen ominaistuuksien vaihtelee joka tapauksessa sen verran, että samassa tienkohdassa kahden saman suuruisten staattisen akselimassan dynaamisen painon ero voi olla suhteellisen tasaisellakin tiellä jopa 40 %.

Laskentamenetelmällä määritettiin myös kesän 2000 aikana mitatuille yli 22 000 etuakselille massat ja niiden jakauma, joka vastaa suhteellisen hyvin akselimassatutkimuksen etuakselien massajakaumaa eli malli toimii lähtöoletusten mukaisesti (Kuva 39). Lasketun massajakauman ala- ja yläpään tulee väistämättä tuloksia,

joiden kohdalla malli ei toimi. Voidaan kuitenkin todeta, että mallilla laskettuja massan arvoja voidaan käyttää ainakin erilaisissa tilastollisissa analyyseissa, jolloin yksittäisten poikkeamien merkitys pienenee.



Kuva 39. Viimeisimmän akselimassatutkimuksen ja kesän 2000 aikana mitattujen Temmeksen tulosten pohjalta määritetyt etuakselien akselimassaja-kaumat.

6 Painemittaukseen perustuvan kuormitusmittausjärjestelmän periaate

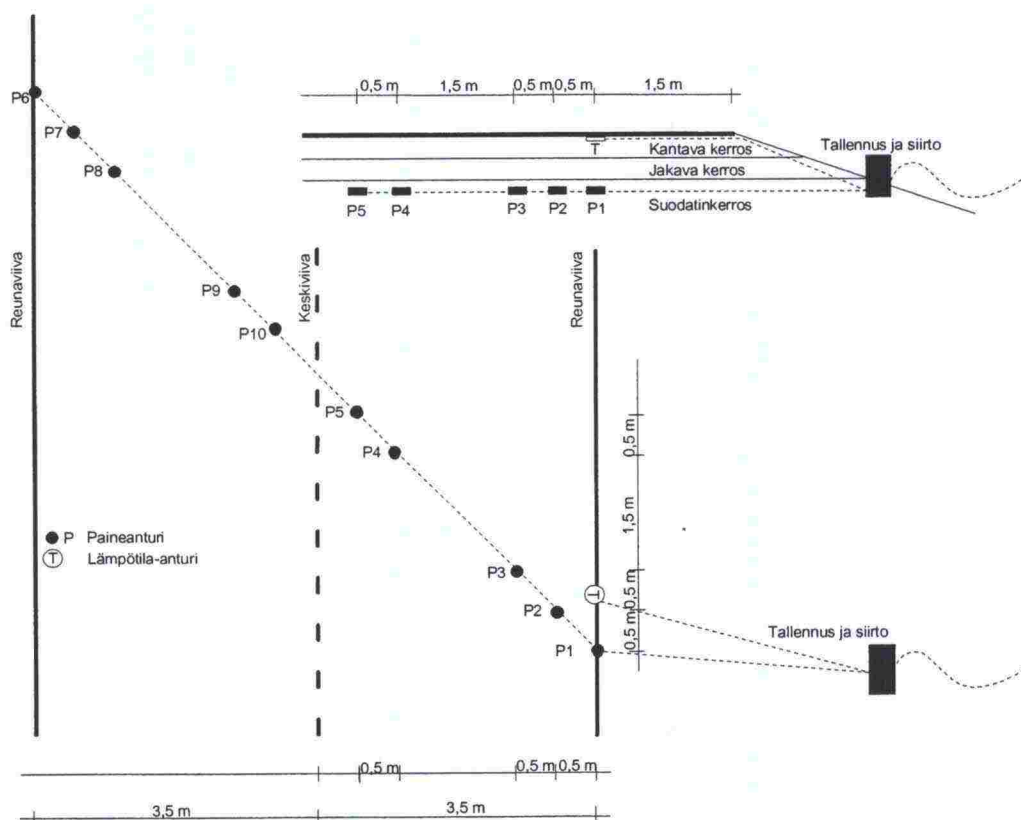
Koska kuormituksen aiheuttaman paineen mittaamiseen suodatinkerroksesta on löydetty luotettava menetelmä ja näyttää siltä, että mittaustulosten perusteella on määritettävissä kuormitukset suhteellisen luotettavasti, on olemassa hyvät edellytykset kehittää painemittaukseen perustuva tierakenteen kuormituksia ja toimintaa mittaava järjestelmä. Massojen mittaus perustuisi tässä työssä kuvattuun periaatteeseen, jossa pitkäaikaisten mittaustulosten perusteella mallinnetaan eri tekijöiden vaikutukset ja laskenta suoritetaan tulosten perusteella jälkeen päin. Järjestelmän kalibrointi perustuisi siis esimerkiksi yhden kesän mittaustulosten tarkasteluun, mitä varten on kehitettävissä automatisoitu menetelmä.

Tämän työn perusteella korkealuokkaisella tiellä tärkein akselimassan ja akselipaineen yhteyteen vaikuttava tekijä on kuormituksen sijainti anturiin nähden. Lisäämällä anturien lukumäärää poikkileikkauksessa saadaan tulosten tarkkuutta parannettua ja sijoittamalla anturit poikkileikkaukseen porrastetusti voidaan samalla mitata ajotapatiedot. Esimerkiksi kuvan 40 instrumentoinnilla olisi mahdollista määrittää ylittäneen ajoneuvoyhdistelmän

- ajoneuvotyyppi
- ajolinja
- nopeus
- akselien väliset etäisyydet

- rengastus
- akselimassat
- paineen jakautuminen horisontaalisuunnassa anturien tasolla.

Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi tuloksista voidaan määrittää paljon erilaisia liikennetekniikkaan liittyviä tekijöitä kuten raskaan liikenteen määriä ja koostumusta.



Kuva 40. Esimerkkikuva anturien sijoittamisesta 7 metriä leveälle ajoradalle.

Painemittaukseen perustuvalla järjestelmällä on paljon hyviä puolia verrattuna päällysteen pintaan tai alapuolelle asennettuihin akselipainovaakoihin:

- Paineanturit ovat erittäin toimintavarmoja. Temmeksen koetiekohteeseen asennetut paineanturit ovat toimineet ja antaneet selkeitä tuloksia jatkuvasti vuodesta 1997 lähtien.
- Suodatinkerrokseen asennettu järjestelmä ei vahingoita tierakennetta eikä tätä kautta aiheuta dynaamisten kuormitusten lisääntymistä ja vaikuta itse mitattavaan asiaan.
- Suodatinkerroksen painetta mittaamalla saadaan tietoa myös ylempien rakennekerrosten toiminnasta kuormituksen alla.

- Painemittauksella saadaan suoraa tietoa kuormitusvaikutuksista, mikä antaa hyvää pohjaa esim. kuormituskertaluvun laskentamenetelmien kehitykselle.

Haittapuolena voidaan pitää sitä, että anturit tulee sijoittaa tierakenteeseen joko rakennusaikana tai rakenteen parantamisen yhteydessä. Painemittaukseen perustuva akselimassan määrittäminen edellyttää mahdollisimman tasaista tien pinnan pituussuuntaista profiilia, jotta dynaamisten kuormien vaikutus jää pieneksi. Jälkiasennuksessa tierakennekerrokset on vaikeaa saada ympäröivän rakenteen kanssa samaan tiiviyyteen, minkä vuoksi ajan kuluessa painumat poikkeavat muusta rakenteesta. Tämä aiheuttaa tien pintaan epätasaisuutta, mikä taas aiheuttaa ajoneuvojen dynaamisten kuormitusten kasvua. Siitä seuraa, että painemittauksen tulosten tarkkuus heikkenee.

Järjestelmän laitteisto- ja asennuskustannukset ovat suhteellisen alhaiset, kun anturien asennus tehdään ennen murskekerrosten rakentamista. Mittausjärjestelmän komponenttien, asentamisen ja toimintakuntoon saattamisen kustannukset ovat summittaisten arvioiden mukaan alle 200 000 markkaa.

Järjestelmän käyttö edellyttää pitkälle vietyä automatisointia niin mittauksissa kuin tulosten käsittelyssä. Jos mittaus toimii kuten Temmeksessä eli tuloksia tallennetaan vain ajoneuvoylitysten ajalta, vilkkaimmiltakin teiltä tarvitaan mittaustuloksia korkeintaan muutamia kymmeniä megatavuja vuorokaudessa, joten mittaustulosten määrä ei ole edes nykyisin käytettävissä olevalla tiedonsiirto- tai laskentakapasiteetilla ongelma, joten tulevaisuudessa järjestelmän käyttöä ei vaikeuta ainakaan mittaustulosten liian suuri määrä.

Mittaustulosten käsittely perustuisi tässä työssä käytettyyn periaatteeseen, jossa tekijöiden määrittäminen tehtäisiin pitkäaikaisten mittaustulosten pohjalta. Koska mitataan asioita, joilla on selkeät teoreettisesti tunnetut suhteet toisiinsa ja määritettäviin tekijöihin, on eri tekijöiden määrittämiseksi käytettävissä useita erilaisia reunaehtoja. Tämä mahdollistaa esimerkiksi akselimassojen määrittämisen yhteydessä erilaisia tarkistuksia, jotka mahdollistaisivat esimerkiksi tierakenteessa tapahtuvien muutosten vaikutusten huomioon ottamisen.

7 Yhteenveto

Liikennekuormitus on tärkein tierakenteen kestoikään vaikuttava kuormitus, joten sen tunteminen on erittäin tärkeää tierakenteen toiminnallista kestoikää ennustettaessa. Liikennekuormituksen määrittämiseksi on kehitetty erilaisia reaali liikenteen akselimassoja mittaavia järjestelmiä, mutta niiden toiminta Suomen olosuhteissa ja suomalaisissa tierakenteissa on osoittautunut epävarmaksi ja tulosten luotettavuus on ollut suhteellisen huono [Huhtala, 1994]. Akselimassojen määrittäminen ei pelkästään riitä, kun halutaan selvittää liikennekuormituksia tierakenteen toiminnallisen kestoikään ja mitoituksen kannalta. Akselin kuormitusvaikutus riippuu massan lisäksi huomattavasti myös ajoneuvotekniikkaan liittyvistä asioista kuten rengastuksesta sekä vallitsevista ympäristöolosuhteista. Myös kuormitusten jakautumisella

tien leveyssuunnassa eli ajoneuvojen ajolinjalla on vaikutusta kuormitusvaikutukseen.

Akselimassoja paremmin akselin tierakenteeseen aiheuttamaa kuormitusvaikutusta kuvaa tierakenteesta mitatut vasteet eli jännitykset ja muodonmuutokset. Temmeksen koetiekohteessa on mitattu liikennekuormitusten tierakenteeseen aiheuttamia vasteita jo yli kolmen vuoden ajan ja tiettyjen anturien toiminta on todettu luotettavaksi. Näyttää siltä, että tierakenteen vasteita on helpompi mitata kuin tierakenteeseen kohdistuneita kuormituksia. Tässä työssä tarkasteltiin mahdollisuutta akselimassojen määrittämiseen Temmeksen koetiekohteesta mitatun aineiston perusteella. Lähtöoletuksena oli, että tierakenteesta akseliylityksen aikana mitatun pystysuuntaisen paineen perusteella voidaan määrittää paineen aiheuttaneen akselin massa, kun olosuhde- ja ajotapatekijöiden vaikutukset tunnetaan.

Akselimassan ja sen aiheuttaneen paineen suhteeseen vaikuttavia tekijöitä selvitetiin vuosien 1998 ja 1999 aikana mitatun aineiston perusteella. Tarkastelujen perusteella päätettiin käsitellä vain kesäajan tuloksia, koska talviaikana valitun anturin yläpuolisen rakenteen jäykkyys on niin suuri, että anturin antamien tulosten tarkkuus heikkenee. Kesäajan tulosten perusteella suodatinkerroksen dynaamisiin paineisiin vaikuttaviksi tekijöiksi saatiin kuormituksen suuruuden lisäksi päällysteen lämpötila ja ajoneuvon ajolinja.

Varsinaista massojen määritysmenetelmää voitiin alkaa selvittää vasta, kun ajotapamittauslaitteisto saatiin kalibroitua ja tulosten luotettavuus varmistettua marraskuussa 2000. Periaatteena oli määrittää eri tekijöiden vaikutukset laajan mittausaineiston tilastollisella tarkastelulla ja etsiä tämän jälkeen yhteys paineiden ja kuormitusten välille käyttämällä koetiealueella tehtyjen kuormitustestien tuloksia ja viimeisimmän akselimassatutkimuksen tuloksia.

Tämän työn tulosten perusteella voidaan todeta, että etuakseliin massojen määrittäminen Temmeksen koetiekohteesta mitatun aineiston avulla on mahdollista ja tulosten luotettavuus suhteellisen hyvä. Kuormitustestien aineiston perusteella menetelmä ylittää Eurooppalaisen tutkimusprojektin WIM-vaa'oilte tekemän luokituksen mukaan luokkaan B(10), joka riittää yksityiskohtaisten tietojen keräämiseen liikenteestä. Käyttämällä useampaa paineanturia porrastetusti tien pituussuunnassa olisi mahdollista mitata akselimassojen lisäksi monia muita raskaaseen liikenteeseen ja tierakenteen toimintaan liittyviä asioita. Ennen kuin aletaan kehittää uusia mittausjärjestelmiä on kuitenkin syytä selvittää, mitä tietoja Temmeksen koetiekohteen tulosten perusteella on saatavissa. Esimerkiksi päällysteen vaurioitumisen vaikutukset painemittausten kannalta tulisi tuntea ennen uusien järjestelmien asentamista.

Jatkossa tehdään tässä työssä kuvatun menetelmän pohjalta vastaavat tarkastelut paripyörille ja teliakseleille, jolloin kaikille akseleille voidaan määrittää massat ja liittää tulokset tämän työn pohjana käytettyyn kantaan. Kun tunnetaan kuormituksen sijainti ja suuruus, antaa tietokanta erinomaisen pohjan esimerkiksi koetiealueen muiden anturien tulosten tulkinnalle. Toisaalta tuloskannan pohjalta voidaan määrittää monenlaisia liikennetekniikkaan liittyviä tekijöitä ja tarkastella näitä myös tierakenteen toiminnan kannalta. Yhtenä esimerkkinä voidaan pitää raskaan liikenteen

ajoneuvotyyppien kuormitusvastaavuusarvojen tarkastelua tierakenteesta mitattujen vasteiden perusteella.

Tierakenteen mitoituksen kannalta pidetään kriittisinä vasteina päällysteen alapinnan venymää ja alusrakenteen yläpinnan puristusjännitystä. Koska myös kantavan kerroksen pysyvillä muodonmuutoksilla on todettu olevan selkeästi merkitystä tien poikkisuuntaisen epätasaisuuden kehittymiseen Suomessa, voidaan myös kantavan kerroksen jännityksiä ja muodonmuutoksia pitää kriittisinä vasteina [Belt, 2000]. Koska kaikkia kriittisiä vasteita on mitattu Temmeksen koetiekohteessa, on eri tekijöiden vaikutukset niihin selvitettävissä, kun tiedetään kuormitusten suuruus, sijainti ja mittaushetken ympäristöolosuhteet. Tämän työn tuloksena saatu tietokanta antaa siis hyvän pohjan myös kriittisten vasteiden tarkasteluille Temmeksen koetiekohteessa.

Lähdeluettelo

Akselimassatutkimus 1998-1999. Helsinki 2000. Tielaitos, tiestötiedot. Tielaitoksen selvityksiä 6/2000, 275 s.

Belt, J., Lämsä, V-P., Ehrola, E. Kevytpäällysteiden vauriomallien mitoitusmenetelmien kehittämisen perusteet. Tielaitoksen selvityksiä. Helsinki 2000. 18/2000. 80 s. +liit.

Belt, J., Lämsä, V-P., Ehrola, E. Sitomattoman kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset. Tielaitoksen selvityksiä 60/2000. Helsinki 2000. 44 s. +liit.

Ehrola, E. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennusteito Oy. Tampere 1996. 365 s.

Halonen, P., Huhtala, M., Laitinen, V. Dynaaminen rasitusindeksi (DRI). Helsinki 1993, Tielaitos, Tutkimuskeskus. Tielaitoksen selvityksiä 74/1993, 41 s. +liit.

Huhtala, M., Halonen, P. Automaattisten akselipainovaakojen mittaustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Helsinki 1994. Tielaitos, Tutkimuskeskus. Tielaitoksen selvityksiä 65/1994. 45 s. +liit.

Jacob, B., O'Brien, J. European Specification on Weight-In-Motion of Road Vehicles. 2nd European Conference. Lisbon 1998. pp 171-185.

Kilponen, A.. Tierakenteen instrumentointi. Diplomityö. Oulun yliopiston rakentamistekniikan osasto. Oulu 1997. 118 s.

Lämsä, V.P.. Instrumentoidun tierakenteen mittaus- ja tutkimussuunnitelma. Diplomityö. Oulun yliopiston rakentamistekniikan osasto. Oulu 1998. 101 s.

Pihlajamäki, J. Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992. Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä - Neste oy:n kantavuusradan pyörä. Helsinki 1993. Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä 60/1993, 39 s. + liit.

Ryynänen, T., 2000. Instrumentoidun tierakenteen mittaukset. Ympäristötekijät 1998-1999. Tielaitoksen selvityksiä, 42/2000. Helsinki 2000. 58 s.

Sikiö, J. Temmeksen instrumentoidun koetien havaintomittaukset. Diplomityö. Oulun yliopiston rakentamistekniikan osasto. Oulu 1999. 87 s.

Liiteluettelo

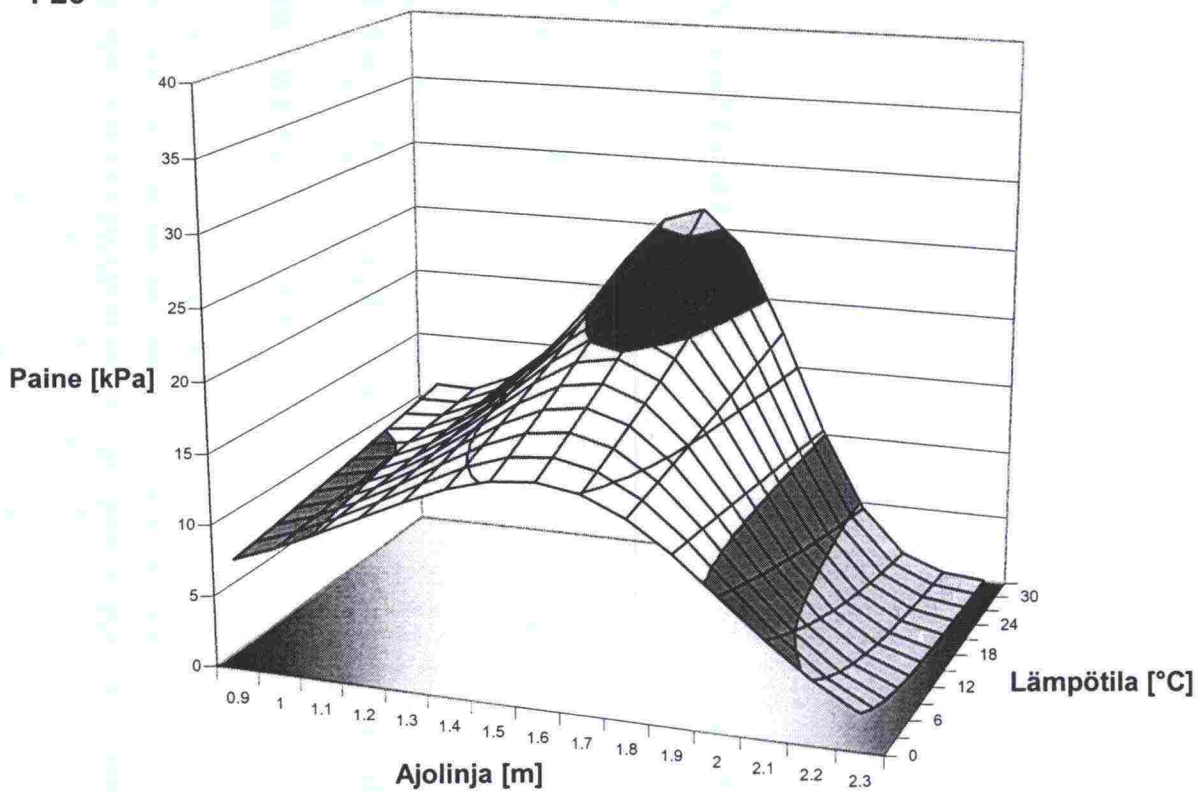
1. Kesän 2000 P4-painetulosten käsittelyjen päivittäiset yhteenvetotiedot. 2 s.
2. Viiden vakiokuormituksen aiheuttamien paineiden muutokset lämpötilan ja ajolinjan funktiona. 3 s.

Pvm.	Alku	Loppu	Mitattu	Lkm	1-aks	2-aks	3-aks	4-aks	5-aks	6-aks	7-aks	8-aks	>8-aks	Aks. yht.	Yksittäisaks.	Teliaks.	Telejä	2-aks.telejä	3-aks.telejä
12.07	14.02	22.00	7.57	178	2	22	12	7	12	28	76	17	1	1022	283	739	345	300	45
13.07	00.40	23.19	22.39	354	3	62	24	23	42	64	113	20	2	1866	629	1237	580	505	75
14.07	00.10	23.26	23.16	273	4	69	16	23	38	53	58	11	0	1291	521	770	363	320	43
15.07	00.11	21.41	21.29	98	1	29	12	5	11	19	19	0	1	429	173	256	125	119	6
16.07	20.56	23.19	2.22	32	1	7	3	0	0	4	12	4	0	169	46	123	58	51	7
17.07	00.17	23.01	22.43	281	1	48	24	15	38	49	83	21	1	1479	504	975	456	395	61
24.07	09.40	23.14	13.34	232	1	41	14	11	26	43	78	16	1	1250	395	855	399	343	56
25.07	00.12	23.17	23.5	325	2	47	19	21	36	73	103	22	1	1769	581	1188	564	507	57
26.07	00.11	23.25	23.13	337	1	57	21	24	33	58	114	27	1	1818	576	1242	584	512	72
27.07	00.06	23.16	23.10	345	4	63	19	25	50	62	108	13	0	1771	636	1135	538	479	59
28.07	00.18	23.17	22.58	287	6	71	21	15	38	48	73	14	0	1378	531	847	402	359	43
29.07	00.07	23.26	23.18	122	1	59	11	3	12	18	16	1	0	454	233	221	105	95	10
30.07	00.33	09.53	9.19	31	2	13	1	0	4	3	7	0	0	120	57	63	30	27	3
03.08	13.23	22.32	9.9	185	4	35	8	4	18	29	66	18	2	1013	291	722	334	282	52
04.08	00.05	23.24	23.19	286	4	83	22	19	34	36	76	10	1	1326	519	807	383	343	40
05.08	00.16	22.53	22.36	100	3	45	9	1	13	12	15	0	1	381	186	195	93	84	9
08.08	00.11	12.12	12.0	155	1	34	6	10	23	30	43	7	0	780	283	497	236	213	23
09.08	09.15	23.29	14.14	301	1	51	14	23	55	58	74	21	3	1581	564	1017	475	410	65
10.08	10.41	22.23	11.41	273	3	43	17	18	35	52	91	13	0	1442	481	961	454	403	51
15.08	08.23	21.33	13.10	302	3	54	16	21	39	68	81	17	2	1577	561	1016	472	403	69
16.08	00.09	23.16	23.6	390	3	59	27	28	55	83	115	17	2	2054	718	1336	630	555	75
17.08	00.11	23.29	23.18	390	5	69	27	26	50	84	103	23	2	2017	691	1326	625	551	74
18.08	00.03	23.29	23.25	310	6	61	13	24	50	72	69	11	3	1550	580	970	453	392	61
19.08	00.13	23.11	22.57	136	2	45	10	4	20	33	19	1	1	592	269	323	155	143	12
20.08	01.28	23.27	21.58	184	1	32	11	5	24	41	54	15	0	988	324	664	319	293	26
21.08	00.39	21.30	20.51	323	4	58	20	20	52	71	79	17	1	1652	602	1050	496	439	57
23.08	09.06	23.29	14.23	341	1	43	21	28	50	87	85	24	1	1833	653	1180	548	465	83
24.08	08.55	23.29	14.34	333	2	57	17	26	45	70	93	21	1	1755	594	1161	551	493	58
25.08	09.00	22.40	13.39	258	3	64	16	17	32	58	56	10	1	1243	495	748	354	316	38
26.08	00.06	22.59	22.52	178	2	55	11	10	28	45	24	2	0	786	353	433	208	191	17
27.08	00.47	23.28	22.40	210	2	43	13	5	30	40	63	13	0	1089	376	713	341	310	31
28.08	00.03	23.29	23.25	345	3	55	25	21	50	77	89	23	1	1809	642	1167	550	486	64
29.08	00.02	23.23	23.20	422	13	64	20	30	64	99	108	21	2	2188	787	1401	663	591	72
30.08	00.09	23.23	23.14	405	5	55	27	26	62	101	106	20	2	2148	752	1396	655	570	85
31.08	00.05	23.27	23.21	441	2	71	31	26	65	114	104	24	3	2312	829	1483	701	623	78
01.09	00.09	23.17	23.8	345	3	77	28	25	44	91	64	9	3	1662	663	999	473	421	52
02.09	00.15	23.17	23.2	185	4	62	15	7	27	45	23	1	0	777	372	405	199	193	6
04.09	08.26	22.16	13.49	309	2	48	19	22	43	76	78	17	3	1633	584	1049	491	429	62
06.09	08.47	22.57	14.10	324	3	40	16	20	56	83	84	19	2	1760	620	1140	538	475	63
07.09	00.08	23.02	22.54	437	5	74	30	28	68	105	98	23	5	2251	820	1431	667	572	95
13.09	18.20	23.32	5.11	120	0	8	9	7	13	28	49	4	1	698	214	484	229	205	24
14.09	15.27	23.33	8.5	203	3	32	13	15	26	42	52	16	3	1072	376	696	324	276	48
15.09	08.53	22.32	13.38	274	0	70	16	20	49	64	45	8	1	1292	543	749	354	315	39
16.09	00.03	23.20	23.17	214	1	76	14	11	32	54	23	1	1	907	448	459	222	208	14
17.09	00.26	23.25	22.59	234	4	58	9	16	42	40	52	12	0	1129	459	670	321	295	26
19.09	08.35	16.38	8.2	194	3	38	8	16	36	44	40	7	1	957	385	572	273	248	25
20.09	08.32	23.30	14.58	360	4	50	20	25	52	99	88	21	0	1908	692	1216	579	523	56
22.09	07.54	23.25	15.31	337	5	58	18	28	83	82	52	10	0	1641	716	925	447	418	29

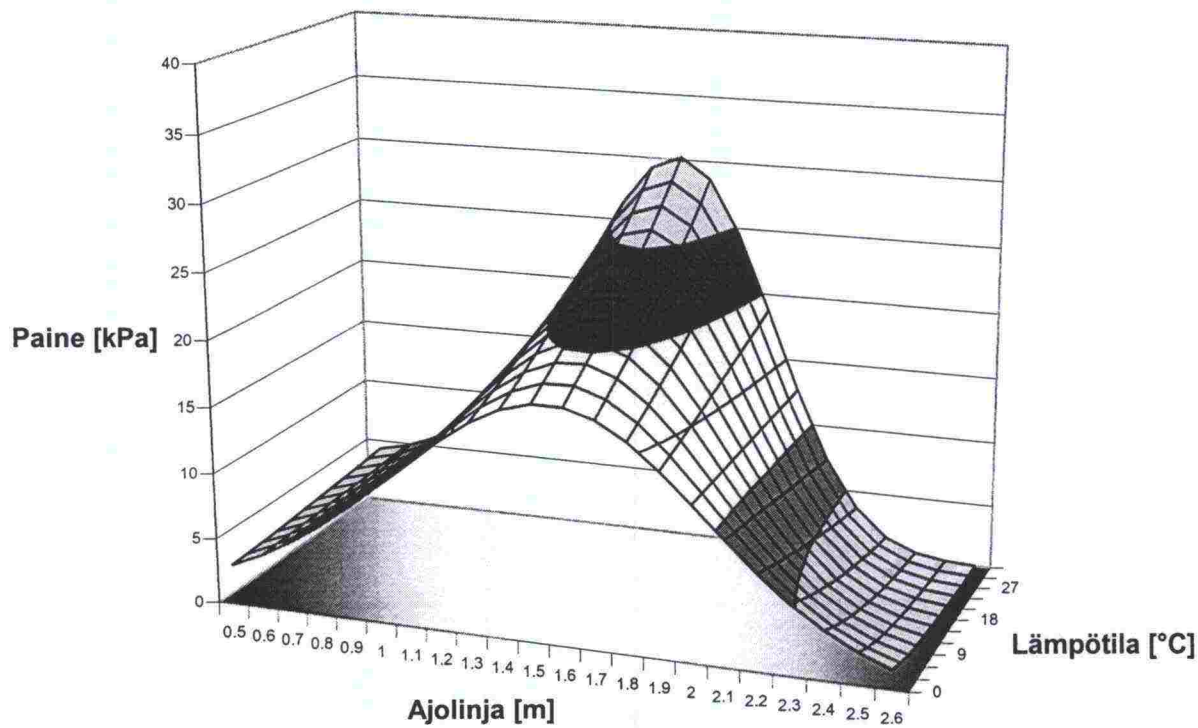
Yhteenvedot/Kesä 2000

Pvm.	Alku	Loppu	Mitattu	Lkm	1-aks	2-aks	3-aks	4-aks	5-aks	6-aks	7-aks	8-aks	>8-aks	Aks. yht.	Yksittäisaks.	Teliaks.	Telejä	2-aks.telejä	3-aks.telejä
26.09	10.12	23.26	13.14	316	1	51	13	30	60	64	76	18	2	1647	634	1013	477	419	58
27.09	08.38	20.55	12.17	300	3	55	14	19	59	59	79	10	1	1530	574	956	455	411	44
28.09	00.08	23.28	23.20	454	7	82	30	32	91	85	102	24	0	2265	908	1357	646	582	64
29.09	00.07	23.27	23.19	311	5	69	20	28	69	55	50	11	3	1468	638	830	389	340	49
02.10	09.08	21.33	12.24	228	1	36	9	17	47	34	71	12	0	1203	422	781	367	322	45
04.10	09.01	23.11	14.10	344	3	46	21	20	71	67	93	21	1	1825	649	1176	554	488	66
06.10	08.50	23.19	14.29	231	3	56	16	24	40	37	41	12	1	1079	452	627	293	253	40
09.10	08.10	23.31	15.20	270	1	34	14	21	46	53	79	19	2	1469	502	967	455	400	55
10.10	08.30	20.53	12.22	272	1	44	18	23	46	52	69	17	1	1413	523	890	412	350	62
11.10	00.03	18.15	18.12	288	3	56	10	23	52	54	80	9	0	1459	551	908	432	391	41
12.10	00.24	00.59	0.35	286	0	53	15	25	42	44	71	21	14	1562	911	651	306	282	24
13.10	08.33	23.19	14.45	264	2	60	9	18	65	51	45	11	2	1282	535	747	347	296	51
16.10	08.51	21.54	13.2	212	6	34	12	10	32	39	70	6	2	1106	397	709	339	309	30
17.10	00.06	23.26	23.20	466	7	74	27	46	105	73	107	22	4	2353	961	1392	650	565	85
18.10	00.06	17.50	17.43	294	4	58	11	26	71	42	67	13	1	1450	602	848	400	353	47
19.10	09.30	23.30	13.59	305	2	35	19	29	62	55	84	17	1	1627	607	1020	482	427	55
20.10	08.56	23.30	14.34	230	1	45	11	25	52	34	49	11	1	1134	483	651	306	267	39
23.10	09.42	20.45	11.2	232	0	38	13	19	55	36	54	15	1	1194	462	732	342	295	47
24.10	00.04	23.28	23.24	401	3	53	16	29	87	80	112	18	2	2145	784	1361	644	573	71
25.10	00.10	12.17	12.6	139	1	22	14	11	37	22	29	2	0	672	291	381	184	171	13
26.10	08.25	23.27	15.1	341	2	56	14	34	80	46	83	25	0	1756	676	1080	508	445	63
27.10	09.30	18.21	8.51	164	1	53	6	14	39	22	25	3	0	709	346	363	170	148	22
30.10	12.02	23.57	11.54	296	46	99	24	123	2	1	0	0	0	828	822	6	3	3	0
31.10	08.39	23.27	14.48	330	34	75	32	150	29	4	2	1	2	1104	994	110	45	25	20
01.11	09.35	21.23	11.48	289	1	37	15	20	74	51	72	18	0	1531	573	958	457	413	44
02.11	00.04	23.23	23.19	461	1	56	14	45	135	78	105	25	1	2426	975	1451	686	611	75
03.11	00.09	23.16	23.6	380	3	71	21	33	129	48	59	13	2	1814	827	987	466	411	55
04.11	00.09	23.21	23.11	166	1	36	10	15	58	28	17	0	0	745	394	351	171	163	8
05.11	00.02	23.27	23.24	224	5	45	9	15	50	33	52	14	0	1111	455	656	313	283	30
06.11	00.28	23.25	22.57	308	3	50	19	23	59	37	93	21	2	1616	574	1042	492	436	56
07.11	00.02	23.22	23.20	372	0	50	22	35	74	59	105	25	1	1981	738	1243	588	522	66
08.11	00.03	23.28	23.24	402	1	64	24	26	97	58	102	25	4	2106	778	1328	613	520	93
09.11	00.05	23.21	23.15	388	7	57	17	30	90	60	96	30	0	2021	755	1266	594	520	74
10.11	00.03	23.27	23.23	308	1	70	23	30	66	41	64	11	1	1457	627	830	395	358	37
11.11	00.05	22.31	22.26	137	1	45	9	12	31	15	23	0	0	577	290	287	138	128	10
12.11	00.20	23.24	23.3	214	0	41	14	11	46	29	60	9	3	1101	420	681	317	273	44
13.11	00.04	23.27	23.22	373	1	53	15	27	96	57	98	20	5	1987	743	1244	579	498	81
14.11	00.08	19.7	18.59	322	3	44	20	25	96	57	59	13	4	1632	667	965	453	399	54
16.11	09.11	23.27	14.15	339	0	52	12	29	83	61	82	17	2	1771	703	1068	503	444	59
17.11	09.07	23.26	14.19	282	1	53	14	25	79	54	46	8	1	1369	628	741	357	332	25
26.11	00.32	23.28	22.56	215	7	56	5	24	52	17	47	6	0	974	473	501	243	228	15
YHTEENSA				22790	295	4277	1342	1865	3999	4289	5418	1114	109	114497	44825	69672	32873	29094	3779

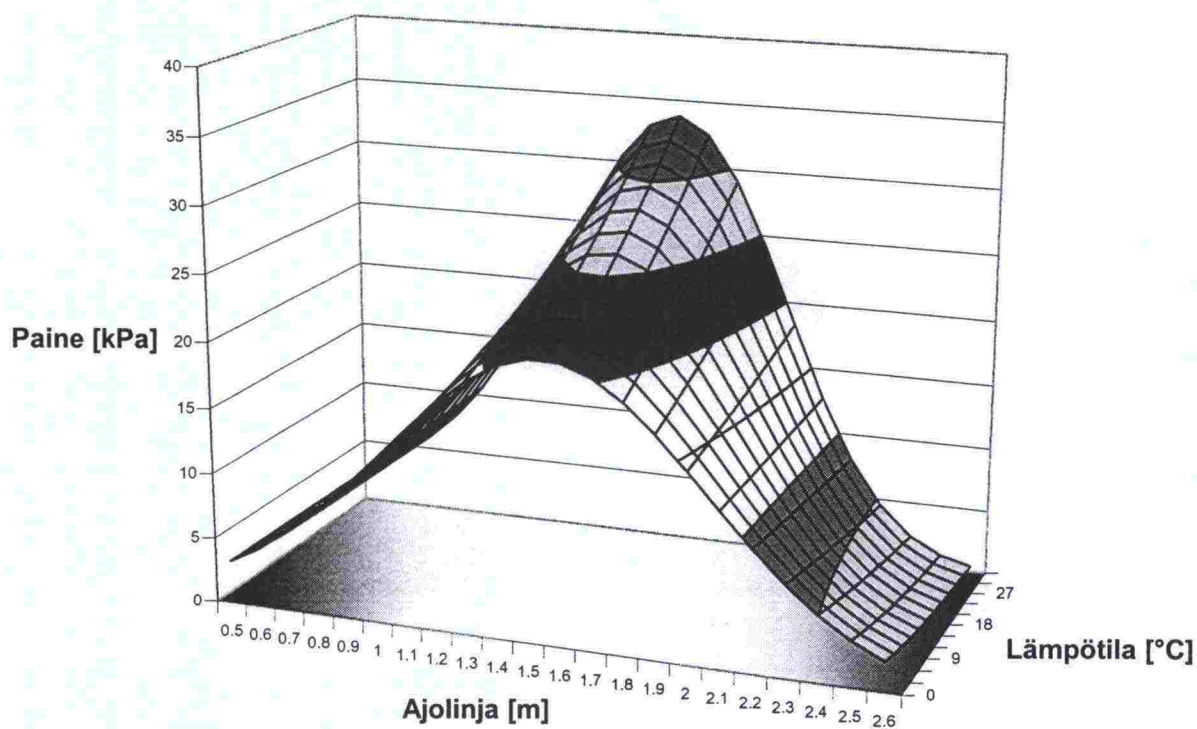
F25



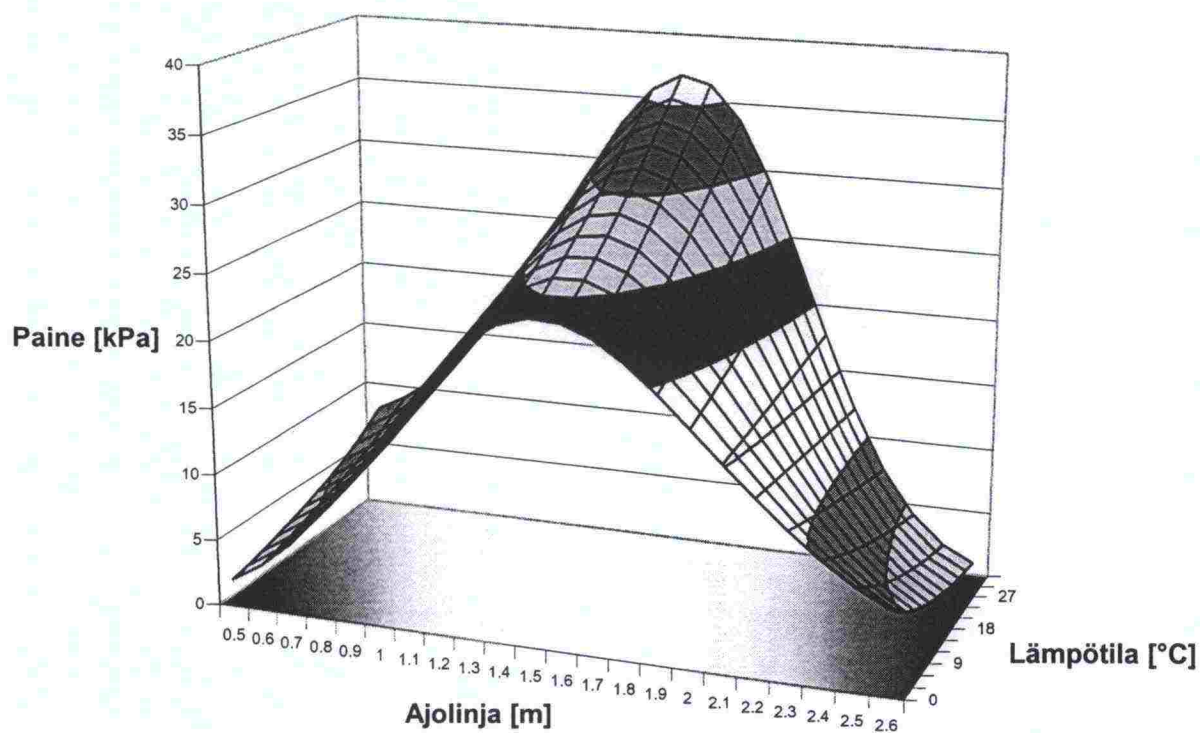
F50



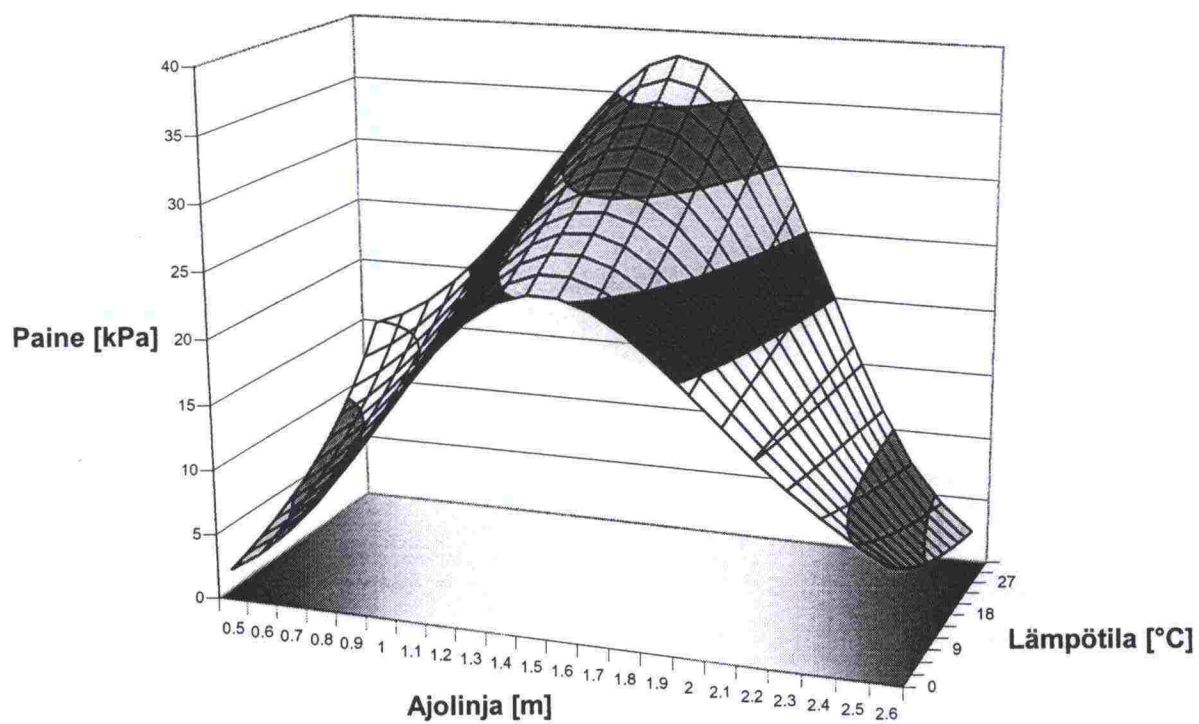
F75



F90



F95



ISSN 1457-9871
ISBN 951-726-753-~~8~~3
TIEH 3200669